



MANUEL SUR LA FERTILITE Publication 611F DU SOL



MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'ALIMENTATION ET DES AFFAIRES RURALES



Carence en azote

Maïs, comté de Bruce

- Symptômes apparaissant d'abord sur les feuilles inférieures; mobilité du N dans la plante.
- Signes d'une perte ou d'une fixation du N ou d'une sous-fertilisation.

Voir p. 65

Carence en potassium



Lucerne, comté de Bruce



Soya, comté de Prescott

Source : Brad King, CCA-ON

- Symptômes apparaissant d'abord sur les vieilles feuilles du bas; très grande mobilité du K dans la plante.
- Signes d'un sol pauvre ou d'un mauvais enracinement (maladies, compactage, mauvais drainage, etc.)

Voir p. 75



Source : James D'Aoust, CCA-ON

Carence en magnésium

Maïs, comté de Simcoe

- Symptômes apparaissant ordinairement sur les feuilles inférieures; mobilité du Mg dans la plante.
- Symptômes dont, souvent, les plants se remettent.
- Carence surtout observée dans des sols sableux et acides.

Voir p. 79



Ontario

MANUEL SUR LA FERTILITÉ DU SOL

Publication 611F



Avez-vous besoin d'information technique ou commerciale?

Communiquez avec le Centre d'information agricole :
1 877 424-1300 ou ag.info.omafr@ontario.ca

Cherchez-vous sur Internet de l'information sur les grandes cultures?

Visitez le site www.ontario.ca/cultures

Un guichet unique pour obtenir des fiches
techniques, des articles et des photos sur la
production et l'entretien des grandes cultures.

Commandes

Pour obtenir des renseignements ou un exemplaire de la présente
publication ou de toute autre publication du ministère, veuillez :
composer : le 1 888 466-2372 si vous appelez de l'Ontario,
le 519 826-3700 si vous appelez de l'extérieur de la province, ou
le 519 826-7402 pour avoir accès au service de télécopieur
du MAAARO si vous êtes malentendant(e); ou

envoyer un courriel à l'adresse products.omafr@ontario.ca; ou
visiter le site Web du ministère au www.omafr.gov.on.ca.

La liste complète de tous les produits et services du ministère de l'Agriculture,
de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO), ainsi que des
bons de commande, sont disponibles sur le site Web. Les commandes peuvent
aussi être transmises à ServiceOntario, par télécopieur, au 519 826-3633,
ou par la poste, au 1 ch. Stone Ouest, Guelph (Ontario) N1G 4Y2.

Publié par le ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales
© Imprimeur de la Reine pour l'Ontario, 2006

Toronto, Canada

ISBN 1-4249-2336-0

01-07-1M

Also available in English

Rédacteur

Keith Reid, MAAARO

Corédacteurs

Tom Bruulsema, International Plant Nutrition Institute;
Dale Cowan, Ontario Agri Business Association (OABA);
Christoph Kessel, MAAARO;
Dale Peters, OABA;
Anne Verhallen, MAAARO

Auteurs collaborateurs

MAAARO — Doug Aspinall, Christine Brown, Barb Lovell, Michael Payne,
Keith Reid, Maribeth Fitts, Anne Verhallen, Christoph Kessel,
Donna Speranzini
Université de Guelph — K.J. Janovicek, John Lauzon, Ivan O'Halloran,
Laura Van Eerd

Tom Bruulsema, International Plant Nutrition Institute; Jean Cheval,
Sylvite Sales; Dale Cowan, Agri-food Labs; Craig Drury, Agriculture
et Agroalimentaire Canada (AAC); Wayne Izumi, Stoller Chemical;
Mark Janiec, Terratech Environmental; Tom Oloya, AAC; Dale Peters,
Stratford Agri-Analysis; Gary Roberts, Stratford Agri-Analysis;
John Rowsell, Centre de recherches en agriculture de New Liskeard
(Université de Guelph); Tony Vyn, Université de Guelph; Jerry Winnicki,
Clark Agri-Service Inc.; Laura Young-Neubrand, Cargill Limited

Remerciements

Les auteurs remercient les personnes suivantes de l'effort qu'elles
ont mis à réviser cette publication et à suggérer des améliorations à
y apporter : Jim Brimmer, Stratford Agri Analysis; Ian McDonald,
Adam Hayes, MAAARO; Greg Patterson, A&L Canada Labs;
Burns Stephens, Norfolk Co-op; Ed Tomecek. Photos offertes par :
Janice LeBoeuf, Keith Reid et Elaine Roddy, MAAARO.

La base de données nationales sur la chimie atmosphérique (NatChem)
et les organismes qui contribuent à alimenter cette base de données ont
fourni une aide précieuse aux auteurs en leur donnant accès aux cartes de la
moyenne des dépôts humides pour les périodes de 1990-1994 et de 1996-2000.
Contributeur à alimenter la base de données NATChem : Environnement
Canada, l'Ontario, le Québec, le Nouveau-Brunswick, la Nouvelle-Écosse,
Terre-Neuve, l'Environmental Protection Agency des États-Unis et le National
Atmospheric Deposition Program/National Trends Network des États-Unis.

TABLE DES MATIÈRES

1. Échantillonnage	1	Agents d'extraction.....	20
Échantillonnage de sol.....	1	Choix d'un agent d'extraction.....	21
Prélèvement d'échantillons.....	1	Caractère non interchangeable des	
Prélèvement des échantillons.....	1	résultats obtenus avec des agents	
Mélange.....	2	d'extraction différents.....	23
Tenue de registres.....	4	Contrôle de la qualité.....	23
Variabilité des sols.....	5	Objectifs d'un programme d'accréditation	
Stratégies d'échantillonnage.....	6	des laboratoires.....	24
Échantillons composites.....	6	pH du sol.....	26
Sous-échantillons.....	6	pH tampon.....	26
Géoréférencement.....	7	Méthode de Shoemaker, McLean	
Conditions d'échantillonnage particulières.....	8	et Pratt (SMP).....	26
Semis direct.....	8	Sels solubles.....	28
Travail du sol par zone, en bandes ou sur		Dosage de l'azote des nitrates.....	28
billons et injection du fumier.....	8	Méthodes.....	29
Échantillonnage de diagnostic.....	9	Phosphore.....	30
Échantillonnage de tissus végétaux.....	9	Méthode au bicarbonate de	
Arbres fruitiers et vignes.....	9	sodium (Olsen).....	30
Cultures de plein champ.....	10	Bray P1.....	31
Échantillonnage hors des périodes		Mehlich III.....	32
recommandées.....	10	Potassium, calcium, magnésium, sodium.....	32
Expédition.....	12	Acétate d'ammonium.....	33
Tenue de registres.....	12	Mehlich III.....	33
Échantillonnage du fumier.....	12	Oligo-éléments.....	33
Échantillonnage du fumier liquide.....	12	Zinc.....	34
Échantillonnage du fumier solide.....	12	Extraction au DTPA.....	34
La composition du fumier varie d'une		Extraction à l'aide de la solution	
terme à l'autre.....	13	Mehlich III.....	35
Échantillonnage pour diagnostic des		Manganèse.....	35
carences et toxicités dans le champ.....	14	Extraction à l'acide phosphorique.....	35
Prélèvement d'échantillons de sol à		Fer et cuivre.....	36
des fins de diagnostic.....	15	Bore.....	36
Prélèvement d'échantillons de tissus		Soufre.....	36
à des fins de diagnostic.....	15	Matière organique.....	37
Bibliographie.....	16	Perte par calcination.....	38
2. Analyses de sols, de tissus		Détermination du carbone organique.....	38
végétaux et de fumier	17	Méthode Walkley Black modifiée.....	38
Analyses de sols.....	17	Four à combustion.....	39
Manutention et préparation.....	17	Texture du sol.....	39
Résultats d'une analyse de sol.....	17	Évaluation de la texture.....	39
Présentation des résultats.....	18	Mesure de la texture.....	39

Capacité d'échange cationique et pourcentage de saturation en bases	41	Immobilisation	63
Capacité d'échange cationique	41	Nitrification	63
Pourcentage de saturation en bases	42	Dénitrification	63
Matériel de laboratoire	43	Lessivage	63
Auto-analyseur	43	Rôle de l'azote	64
Absorption atomique	43	Carence en azote	65
Spectrométrie d'émission	44	Phosphore	66
Matière organique	44	Formes de phosphore dans le sol	66
Manutention et préparation	44	Facteurs influençant la biodisponibilité du phosphore	67
Tissus végétaux	44	Rapport entre le phosphore et d'autres éléments nutritifs	70
Fumier	45	Rôle du phosphore chez les végétaux	70
Azote	45	Carence en phosphore	71
Méthode par combustion	45	Potassium	72
Méthode Kjeldahl	45	Formes de potassium dans le sol	72
Azote ammoniacal	45	Facteurs influant sur la biodisponibilité du potassium	72
Calcium, phosphore, potassium, magnésium, manganèse, cuivre, fer, bore	46	Rapport entre le potassium et d'autres éléments nutritifs	73
Métaux réglementés dans les biosolides	46	Rôle du potassium chez les végétaux	74
Bibliographie	47	Carence en potassium	75
Information générale	47	Éléments nutritifs secondaires	76
Pour plus de détails	47	Calcium	76
3. Éléments nutritifs	49	Rapport entre le calcium et d'autres éléments nutritifs	76
Formes des éléments nutritifs	49	Rôle du calcium chez les végétaux	76
Dissous dans la solution de sol	49	Carence en calcium	77
Maintenus à la surface du sol	49	Magnésium	78
Cations	51	Rapport entre le magnésium et d'autres éléments nutritifs	78
Échanges cationiques	51	Rôle du magnésium dans les plantes	78
Fixés à la matière organique	52	Carence en magnésium	79
Retenus comme composés insolubles	53	Soufre	80
Fixés dans les argiles	53	Facteurs influençant les besoins en soufre	82
Transport des éléments nutritifs vers les racines	54	Rôle du soufre chez les végétaux	82
Interception racinaire	54	Carence en soufre	82
Écoulement de masse	56	Oligo-éléments	83
Diffusion	57	Zinc	83
Prélèvement des éléments nutritifs par les plantes	58	Carence en zinc	84
Rôle des éléments nutritifs chez les végétaux	60	Manganèse	85
Éléments nutritifs primaires	61	Carence en manganèse	85
Azote	61	Bore	87
Fixation de l'azote	61	Carence en bore	87
Fixation biologique symbiotique et non symbiotique	61	Cuivre	88
Minéralisation	62	Carence en cuivre	89
		Chlore	89

Fer	91
Carence en fer	91
Molybdène	91
Nickel	92
Minéraux non essentiels	92
Minéraux bénéfiques	92
Éléments indésirables	94
Bibliographie	95
Pour plus de détails	95

4. pH du sol, chaulage et acidification

Facteurs d'augmentation de l'acidité des sols	97
Précipitations	98
Décomposition de la matière organique	99
Matériau d'origine	99
Épandage d'engrais	99
Alcalinisation du sol	99
Traitement des sols à pH élevé	101
Symptômes de problèmes liés au pH	101
pH tampon	102
Qualité de la chaux agricole	105
Valeur neutralisante	105
Indice granulométrique	106
Chaux dolomitique ou calcitique	107
Indice agricole	109
Chaulage	110
Épandage	110
Incorporation	110
Temps de réaction	111
Acidification du sol	112
Réduction du pH du sol	112
Sols pouvant être acidifiés	113
Utilisation du soufre	113
Bibliographie	114

5. Sources organiques d'éléments nutritifs : Fumier, biosolides, légumineuses

Éléments nutritifs tirés des matières d'épandage	116
Similitudes entre les matières	116
Différences entre les matières	117
Teneur en éléments nutritifs de matières de source organique	120
Facteurs influençant la biodisponibilité des éléments nutritifs	124

Azote	124
Phosphore	126
Potassium	126
Éléments nutritifs secondaires et oligo-éléments	127
Prévision de la biodisponibilité des éléments nutritifs dans les matières épandues	127
Interprétation des résultats d'analyses de fumier	127
Azote total, ammoniacal et organique	128
Effets du moment et de la méthode d'application	129
Effets des systèmes de traitement tels que compostage ou digestion anaérobie	130
Prévision de la biodisponibilité de l'azote dans le fumier	131
Vérification de la dose appliquée par le matériel d'épandage	134
Planification de la gestion des éléments nutritifs	135
Défis inhérents à différentes intensités d'élevage	135
Optimisation du fumier comme source d'éléments nutritifs	136
Cultures bénéficiant d'épandages de fumier	137
Prudence avec les épandages de fumier	137
Semis direct et fumier	138
Préoccupations environnementales	138
Utilisation sans danger de doses de fumier supérieures aux besoins des cultures	139
Exigences liées à la réglementation	140
Fumier	141
Biosolides	141
Éléments nutritifs provenant des résidus de culture	141
Légumineuses dans un système cultural	142
Accumulation totale d'azote	142
Azote assimilable provenant des légumineuses	143
Optimisation de la récupération de l'azote	144
Biodisponibilité de l'azote provenant de résidus de cultures autres que légumineuses	146
Gestion de l'azote au moyen de cultures de couverture	146
Bibliographie	148

6. Recommandations de fertilisation	149
Facteurs limitant la réaction des cultures à la fertilisation	149
Élaboration de recommandations de fertilisation	151
Pondération des résultats d'analyse de sol	151
Gain de rendement à la suite d'apports d'engrais	152
Gains de rendement procurés par la fertilité du sol	155
Probabilité de gain de rendement compte tenu de la fertilité du sol	155
Élaboration des recommandations de fertilisation : « fertiliser la culture » ou « fertiliser le sol »	157
Exemple des deux types de pondération des résultats d'analyse de sol	161
Autres points à considérer	162
Objectif de rendement	162
Pourcentages et ratios de saturation en bases	165
Variabilité spatiale	167
Coûts de la sous-fertilisation et de la surfertilisation	169
Conséquences agronomiques et environnementales de la fertilisation	169
Éléments nutritifs prélevés par la culture et enlevés par unité de rendement	170
Recommandations de fertilisation fondées sur l'analyse des tissus végétaux	171
Concentrations insuffisantes, critiques et suffisantes	171
Système intégré de diagnostic et de recommandation (DRIS)	174
Des recommandations de fertilisation et non des normes	174
Bibliographie	177
7. Ingrédients, mélanges et application des engrais	179
Engrais	179
Sources d'azote (N)	179
Urée (46-0-0)	179
Nitrate d'ammonium (34-0-0)	180
Nitrate d'ammonium et de calcium (27-0-0)	180

Solution de nitrate d'ammonium et d'urée (NAU) (de 28-0-0 à 32-0-0)	180
Ammoniac anhydre (82-0-0)	181
Sulfate d'ammonium (21-0-0)	183
Nitrate de calcium (15-0-0)	183
Nitrate de potassium (12-0-44)	183
Sources de phosphore (P)	183
Superphosphate simple (0-20-0)	183
Superphosphate triple (0-46-0)	184
Phosphate monoammonique (PMA; 11-52-0)	184
Phosphate diammonique (PDA; 18-46-0)	184
Solution de polyphosphate d'ammonium	185
Phosphate naturel	185
Sources de potassium (K)	185
Chlorure de potassium (0-0-60 ou 0-0-62)	185
Chlorure de potassium rouge (0-0-60)	185
Chlorure de potassium blanc (0-0-62)	186
Sulfate de potassium (0-0-50)	186
Sulfate de potassium-magnésium (0-0-22)	186
Solutions claires	186
Solutions acides	187
Suspensions	187
Sources d'éléments nutritifs secondaires	188
Calcium	188
Magnésium	188
Soufre	188
Sources d'oligo-éléments	190
Oxysulfates	190
Sulfates	190
Oligo-éléments liquides et solubles	190
Poudres solubles	191
Produits destinés à améliorer l'efficacité des engrais	191
Azote	191
Phosphore	192
Produits destinés à l'agriculture biologique	193
Mélanges d'engrais	193
Inconvénients des mélanges	194
Compatibilité physique et chimique des constituants des mélanges	194

Importance de l'uniformité dans le calibre des granules.....	195
Établissement des formules.....	196
Aspects juridiques.....	197
Application des engrais.....	202
Innocuité pour les cultures.....	202
Méthodes d'application.....	204
Épandage en plein ou en pleine surface.....	204
Épandage en bandes.....	207
Épandage de l'engrais en contact avec la semence.....	208
Épandage en bandes latérales.....	209
Épandage en bandes en profondeur.....	209
Apport d'engrais de démarrage au moment du repiquage.....	210
Fertirrigation.....	211
Combinaison de méthodes.....	211
Feuille de calcul relative aux applications d'engrais.....	212

Doses maximales sécuritaires d'éléments nutritifs.....	212
Source d'engrais et mise en place de l'engrais.....	212
Recommandations de fertilisation et calcul des doses.....	213
Bibliographie.....	214

Annexes	217
A. Feuille de calcul des mélanges d'engrais : exemple pour mélanges N-K ou P-K.....	218
B. Feuille de calcul des mélanges d'engrais : exemple pour mélanges N-P-K.....	219
C. Feuille de calcul relative aux applications d'engrais.....	221
D. Conversions et équivalences.....	222

Glossaire	225
------------------------	-----

Index	231
--------------------	-----

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

1. Échantillonnage

FIGURE 1-1. Du champ au seau au labo.....	2
FIGURE 1-2. Effet de la manipulation des échantillons sur la teneur en azote minéral du sol.....	4
FIGURE 1-3. Exemple de registre pour les grandes cultures.....	4
FIGURE 1-4. Échantillonnage composite.....	7
FIGURE 1-5. Échantillonnage géoréférencé.....	7
FIGURE 1-6. Localisation du point de prélèvement.....	10
TABLEAU 1-1. Calendrier et parties de plantes recommandés pour l'échantillonnage de tissus.....	11
FIGURE 1-7. Échantillonnage de tissus à des fins de diagnostic.....	16

2. Analyses de sols, de tissus végétaux et de fumier

TABLEAU 2-1. Données figurant sur un rapport d'analyse de sol.....	19
TABLEAU 2-2. Corrélation entre le P extractible et le P assimilé en conditions contrôlées de serre.....	23
TABLEAU 2-3. Calcul des besoins en chaux.....	27
TABLEAU 2-4. Interprétation des lectures de conductivité électrique du sol.....	30
TABLEAU 2-5. Agents d'extraction du phosphore.....	31
FIGURE 2-1. Triangle des textures de sol.....	40
TABLEAU 2-6. Équations des pourcentages de saturation en bases.....	43

3. Éléments nutritifs

TABEAU 3-1. CEC type des minéraux argileux	50
FIGURE 3-1. Échanges cationiques	50
TABEAU 3-2. CEC type des sols et de la matière organique	53
FIGURE 3-2. Mouvement des éléments nutritifs dans le sol	54
FIGURE 3-3. Interception racinaire	55
FIGURE 3-4. Zone des poils absorbants	55
FIGURE 3-5. MVA	56
FIGURE 3-6. Écoulement de masse	57
FIGURE 3-7. Diffusion	57
FIGURE 3-8. Xylème et phloème	59
TABEAU 3-3. Importance relative des modes de déplacement des ions, du sol aux racines du maïs	59
TABEAU 3-4. Forme et mobilité des éléments nutritifs dans le sol et les plantes	60
TABEAU 3-5. Espèces du genre <i>Rhizobium</i> associées à différentes cultures de légumineuses	62
TABEAU 3-6. Risques de pertes d'azote des nitrates dans les sols saturés selon la température du sol	63
FIGURE 3-9. Cycle de l'azote	64
FIGURE 3-10. Caractéristiques liées à l'eau de différentes textures de sol	65
FIGURE 3-11. Effet du pH du sol sur les formes de phosphore dans le sol	68
TABEAU 3-7. Concentration de potassium dans certains échantillons de fourrage	74
FIGURE 3-12. Dépôt de soufre atmosphérique	81
TABEAU 3-8. Sensibilité des cultures aux apports d'oligo-éléments	86

4. pH du sol, chaulage et acidification

FIGURE 4-1. Effets du pH du sol sur la biodisponibilité des éléments nutritifs dans les sols minéraux et les sols organiques	98
FIGURE 4-2. Répartition des sols acides en Amérique du Nord	103
TABEAU 4-1. Chaux nécessaire pour corriger l'acidité du sol d'après le pH et le pH tampon du sol	104

TABEAU 4-2. Valeur neutralisante de certains amendements calcaires	106
TABEAU 4-3. Tamis utilisés pour déterminer l'indice granulométrique de la chaux	107
TABEAU 4-4. Détermination de l'indice granulométrique du calcaire	107
FIGURE 4-3. Indice agricole	109
FIGURE 4-4. Quantité de chaux à épandre	109
FIGURE 4-5. Temps de réaction de la chaux selon la finesse des particules	111
TABEAU 4-5. Apports de soufre destinés à l'acidification du sol	112
TABEAU 4-6. Efficacité relative des réducteurs de pH du sol	114

5. Sources organiques d'éléments nutritifs : Fumier, biosolides, légumineuses

TABEAU 5-1. Proportion de l'azote ammoniacal par rapport à l'azote total	116
TABEAU 5-2. Teneurs moyennes en éléments nutritifs des fumiers d'élevage	120
TABEAU 5-3. Quantités moyennes d'éléments nutritifs biodisponibles dans le fumier liquide	121
TABEAU 5-4. Quantités moyennes d'éléments nutritifs assimilables dans le fumier solide	122
TABEAU 5-5. Teneur en éléments nutritifs des biosolides	123
TABEAU 5-6. Teneur en éléments nutritifs de certains composts	123
TABEAU 5-7. Ratios C:N types de certaines matières courantes	125
TABEAU 5-8. Calcul des coefficients de biodisponibilité du phosphore et du potassium dans le fumier	128
TABEAU 5-9. Conversion du coefficient de biodisponibilité en unités de poids	128
TABEAU 5-10. Perte de l'azote ammoniacal contenu dans le fumier sous différentes conditions météorologiques et de sol	129
FIGURE 5-1. Épandage de fumier solide à la surface du sol à l'automne	132
FIGURE 5-2. Épandage de fumier solide au printemps, avec incorporation dans la journée qui suit	132

FIGURE 5-3. Épandage de fumier liquide à la surface du sol à l'automne	133
FIGURE 5-4. Épandage avec injection de fumier liquide au printemps	133
TABEAU 5-11. Densités de fumier	134
TABEAU 5-12. Vérification de la dose appliquée par les épandeurs	135
TABEAU 5-13. Effets de la rotation des cultures sur la concentration d'azote des nitrates dans le sol après les semis et sur les rendements du maïs	144
FIGURE 5-5. Moment et importance de la minéralisation de l'azote fourni par les résidus de cultures de couverture	145
TABEAU 5-14. Correction des besoins en azote après l'enfouissement de légumineuses	145
FIGURE 5-6. Immobilisation de l'azote par différentes cultures de couverture après une récolte automatisée de concombres de transformation, 2004	146
TABEAU 5-15. Effets des cultures de couverture sur le rendement du maïs et les besoins en azote, Embro	147

6. Recommandations de fertilisation

TABEAU 6-1. Facteurs limitant la réaction des cultures à la fertilisation	149
FIGURE 6-1. Gain de rendement dans le maïs à la suite d'apports de phosphore	153
TABEAU 6-2. Probabilité de réaction à la fertilisation à différents niveaux de fertilité du sol	156
TABEAU 6-3. Comparaison des recommandations de fertilisation suivant les deux méthodes de pondération des résultats d'analyse	159
TABEAU 6-4. Quel type de recommandation choisir	160
FIGURE 6-2. Pondération en fonction d'une fertilisation suffisante	163
TABEAU 6-5. Comparaison des doses recommandées selon le type de pondération	164
FIGURE 6-3. Pondération en fonction de l'accroissement et du maintien de la fertilité du sol	164

FIGURE 6-4. Calcul de la dose nécessaire à l'accroissement et au maintien de la fertilité du sol	164
FIGURE 6-5. Détermination du niveau critique de fertilité du sol	165
FIGURE 6-6. Rendement relatif en fonction de divers niveaux de fertilité du sol	166
TABEAU 6-6. Influence de la variabilité des concentrations de K dans le sol sur la dose optimale d'engrais potassique en Ontario ..	168
TABEAU 6-7. Influence de la sous-fertilisation et de la surfertilisation sur le rendement net	169
FIGURE 6-7. Réaction de la tomate à la fertilisation azotée	170
FIGURE 6-8. Rapport entre la teneur en éléments nutritifs des tissus végétaux et la croissance des plantes	172
TABEAU 6-8. Causes pouvant expliquer la surabondance ou l'insuffisance d'éléments nutritifs dans les tissus végétaux	173
TABEAU 6-9. Prélèvement des éléments nutritifs par les grandes cultures et enlèvement des éléments nutritifs à leur récolte en Ontario	175
TABEAU 6-10. Prélèvement des éléments nutritifs par les cultures horticoles et enlèvement des éléments nutritifs à leur récolte en Ontario	176

7. Ingrédients, mélanges et application des engrais

TABEAU 7-1. Ingrédients courants des engrais	182
TABEAU 7-2. Mélanges d'engrais liquides ..	187
TABEAU 7-3. Sources courantes d'éléments nutritifs secondaires et d'oligo-éléments ..	189
FIGURE 7-1. Test de ségrégation	196
FIGURE 7-2. Feuille de calcul des mélanges d'engrais : exemple pour mélanges N-K ou P-K	199
FIGURE 7-3. Feuille de calcul des mélanges d'engrais : exemple pour mélanges N-P-K	200
TABEAU 7-4. Doses maximales sécuritaires d'éléments nutritifs	205
FIGURE 7-4. Feuille de calcul relative aux applications d'engrais	213

1 ÉCHANTILLONNAGE

Échantillonnage de sol

Les agriculteurs prélèvent des échantillons de sol pour :

- préciser les besoins en engrais et chaux;
- poser un diagnostic dans les zones à problème;
- surveiller le degré de fertilité des sols.

Prélèvement d'échantillons

Les producteurs peuvent prélever des échantillons de sol aux moments qui leur conviennent, mais ils le font surtout à l'automne après la récolte. Ils s'assurent ainsi d'un délai suffisant pour recevoir les résultats d'analyse et planifier leur prochaine campagne agricole. L'idéal, pour des raisons d'uniformité, est d'échantillonner les sols à peu près au même moment chaque année et à la suite des mêmes cultures dans la rotation.

Dans la plupart des sols, un échantillonnage aux trois ans suffit. Les sols sableux peuvent nécessiter des échantillonnages plus fréquents, car le degré de fertilité de ces sols peut changer rapidement. Cela vaut aussi pour les cultures qui prélèvent de grandes quantités de potassium, comme celles de la tomate, du maïs à ensilage et de la luzerne. En échantillonnant le tiers des champs chaque année, on s'assure de couvrir toute la ferme aux

trois ans. Dans les zones présentant un problème de fertilité particulier, l'échantillonnage doit être plus fréquent. Échantillonner séparément les zones qui présentent un problème particulier.

L'échantillonnage peut se faire au moyen d'un échantillon composite, c.-à-d. provenant de plusieurs points du champ. Ce mode d'échantillonnage est économique à réaliser et fournit un échantillon représentatif de l'ensemble du champ. Le nombre d'échantillons nécessaires pour caractériser un champ dépend du relief et de la variabilité des sols à l'intérieur du champ, du type d'exploitation et du nombre ainsi que du type de cultures.

Prélèvement des échantillons

Aux fins des analyses de sol normalisées de l'Ontario, les carottes de sol sont prélevées à une profondeur de 15 cm, afin de refléter la fertilité des sols là où se trouve le gros de la masse racinaire pour la plupart des cultures. Quand les échantillons sont prélevés plus superficiellement, les concentrations d'éléments nutritifs dans le sol se trouvent surestimées. À l'inverse, quand les échantillons sont prélevés plus profondément, les concentrations sont sous-estimées.

Dans les champs qui renferment plus d'un type de sol, échantillonner séparément chaque type de

Nota :

Sans équipement particulier, il est impossible de fractionner un échantillon de sol humide en deux sous-échantillons identiques. Souvent, si deux laboratoires obtiennent des résultats d'analyse différents, c'est que les échantillons qu'ils reçoivent sont en fait différents.

sol. Faire aussi un échantillonnage distinct pour les zones à problème. Éviter de prélever des échantillons :

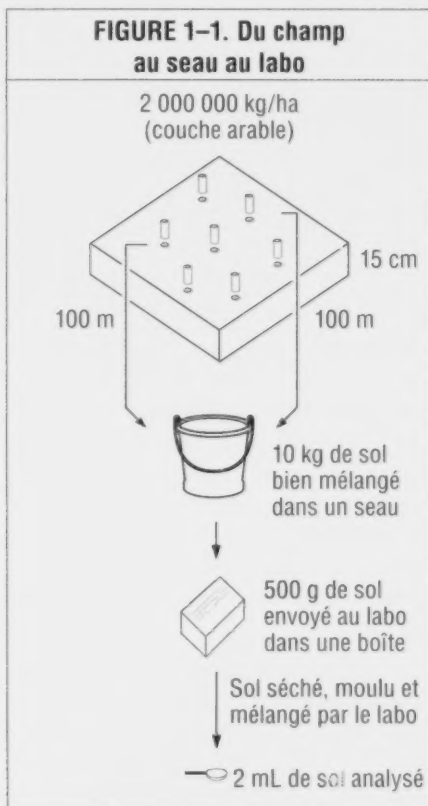
- aux abords de routes revêtues de gravier ou d'asphalte, car la poussière qui s'y accumule fausse les résultats des analyses de sol;
- dans les dérayures, sur les collines très érodées ou aux endroits où se sont accumulés des déchets organiques ou de la chaux, car les échantillons ne seraient pas représentatifs du champ.

Pour connaître la fertilité de l'une ou l'autre de ces zones, prélever un échantillon distinct.

Utiliser de l'acier inoxydable

Se procurer une sonde ou une tarière en acier inoxydable, plutôt qu'en métal galvanisé. Utiliser des seaux propres, en plastique ou en métal non galvanisé, surtout si l'analyse doit porter sur le dosage des oligo-éléments. Ces précautions évitent la contamination de l'échantillon. Puisque les laboratoires préfèrent utiliser une boîte à échantillon pleine, recueillir suffisamment de sol pour obtenir un échantillon composite qui remplira la boîte. Voir la figure 1-1.

FIGURE 1-1. Du champ au seau au labo



Mélange

Bien mélanger les carottes dans le seau, en écrasant les mottes et en éliminant les pierres et les résidus de culture. Remplir la boîte ou le sac à échantillon d'un échantillon représentatif du sol. La représentativité d'un échantillon composite dépend de la minutie avec laquelle il a été prélevé et mélangé.

Exception – dosage des nitrates

Les analyses de sol courantes ne font pas le dosage des nitrates. Les recommandations visant l'azote qui figurent dans la plupart des résultats d'analyse de sol sont fonction des cultures projetées.

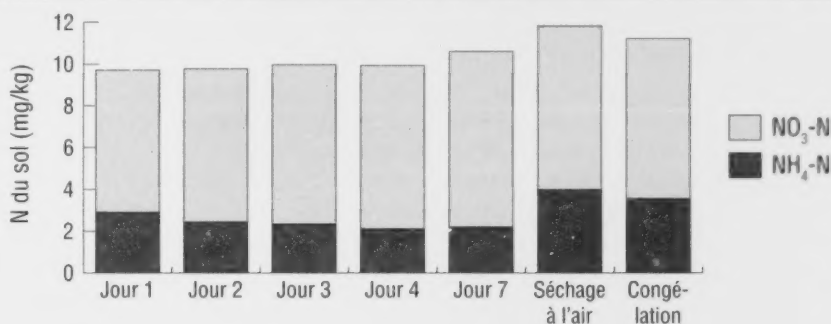
Quand il s'agit de doser les nitrates, le moment du prélèvement des échantillons revêt une grande importance, car les concentrations de nitrates dans le sol varient au cours de l'année sous l'effet du lessivage et des populations de bactéries fixatrices d'azote. Le prélèvement des échantillons peut se faire au moment des semis, dans le cas du maïs ou de l'orge, ou avant l'épandage d'engrais en bandes latérales sur une culture de maïs. Les échantillons prélevés au moment des semis donnent des résultats légèrement plus précis en l'absence de fumier ou de légumineuses, mais les échantillons prélevés avant l'épandage en bandes latérales permettent de déceler davantage de nitrates de sources organiques. Toutefois, le choix du moment du prélèvement n'est pas tant une question de précision qu'une affaire de disponibilité du producteur.

Les échantillons destinés au dosage des nitrates doivent être prélevés plus profondément, soit habituellement à 30 cm. Le dosage se fait en fonction de deux profondeurs de prélèvement, soit 30 et 60 cm. Choisir l'une des deux profondeurs et la maintenir pour l'ensemble du champ. Le schéma d'échantillonnage dans l'ensemble du champ et la procédure de mélange sont les mêmes que pour tout autre échantillon de sol.

Manipuler les sols avec soin. Les entreposer à des températures inférieures à 4 °C jusqu'au moment de l'extraction. Dans le cadre d'une étude portant sur 66 sols de l'Ontario, des chercheurs (Oloya et coll., 2007) ont comparé des sols entreposés à 4 °C pendant 1–7 jours à des sols congelés ou séchés à l'air avant l'extraction. L'analyse effectuée une journée après le prélèvement des échantillons a révélé qu'environ 70 % de l'azote inorganique était sous forme de nitrates ($\text{NO}_3\text{-N}$) et que les 30 % restants étaient sous forme ammoniacale ($\text{NH}_4\text{-N}$). Comme les sols étaient entreposés humides à 4 °C pendant des périodes plus longues, l'ammonium se trouvait converti en nitrates sous l'effet de la nitrification. Voir la figure 1–2. Cette conversion aurait été plus grande encore si les sols avaient été entreposés à la température de la pièce. Les chercheurs ont découvert que les concentrations d'ammonium dans les sols augmentaient de 22 % sous l'effet de la congélation, et de 37 % sous l'effet du séchage à l'air. Les concentrations de nitrates aussi avaient augmenté, mais dans une moindre mesure. Par conséquent, la congélation et le séchage à l'air ne sont pas recommandés, surtout quand on tient compte des teneurs en ammonium. Il est plutôt recommandé que les sols soient entreposés à 4 °C et que l'extraction se fasse dans les quatre jours qui suivent l'échantillonnage, à la même teneur en eau qu'au champ.

Nota : Ne pas congeler ni sécher à l'air un échantillon s'il est destiné au dosage de l'ammonium.

FIGURE 1-2. Effet de la manipulation des échantillons sur la teneur en azote minéral du sol



Oloya, T.O., C.F. Drury et K. Reid., 2007.

Tenue de registres

Étiqueter tous les échantillons de sol destinés au laboratoire. Les numérotter de façon à pouvoir ultérieurement lier les résultats d'analyse à tel ou tel champ. Consigner dans un registre les échantillons qui ont été prélevés et l'endroit où ils l'ont été. Voir la figure 1-3.

Consigner également dans des registres les cultures pratiquées dans chaque champ, les apports d'engrais, les conditions météorologiques et les rendements obtenus. Classer ces données avec les résultats d'analyse de sol. Ces registres

aident à déceler les tendances qui se dessinent d'une année à l'autre, à prendre des décisions de gestion et à cerner les zones problématiques.

Pour mieux organiser l'information sur leurs cultures, les producteurs peuvent recourir à un certain nombre de logiciels ainsi qu'à des consultants en cultures qui, pour la plupart, offrent ce type de service. Compte tenu de la masse d'information générée par les capteurs de rendement des moissonneuses-batteuses et par l'échantillonnage intensif des sols, la tenue de registres informatisés est une nécessité.

FIGURE 1-3. Exemple de registre pour les grandes cultures

DATE/HEURE	NOM OU N° DU CHAMP	TRAVAIL	DÉTAILS

Exemples de codes : D = dépistage; É = échantillonnage; ÉF = épandage de fumier; F = fertilisation; IV = inspection visuelle; P = pulvérisation; R = récolte; S = semis; TS = travail du sol.

Variabilité des sols

La nature des sols varie à l'échelle des champs, mais aussi à l'échelle de quelques centimètres. Cette variabilité peut influencer la croissance des cultures, les stratégies d'échantillonnage et les apports de fertilisants. Il peut y avoir des variations importantes à l'intérieur même de la zone racinaire d'une plante. Il arrive dans ce cas que la variabilité n'ait aucun effet sur la croissance étant donné que les racines se concentrent alors dans les zones de fertilité optimale.

Dans les sols où la fertilité varie beaucoup ou rapidement à grande échelle, des effets peuvent être observés sur la croissance des cultures, sans que des interventions ne soient nécessairement indiquées. Une superficie de 18 m × 30 m peut présenter des concentrations d'éléments nutritifs très variables, mais une telle superficie est inférieure à celle qui est couverte par un passage de l'épandeur. Autrement dit, il s'agit d'une superficie inférieure à la superficie minimale de gestion. En général, la variabilité d'un sol détermine le nombre de carottes à prélever pour constituer un échantillon représentatif.

Même si le type de sol a une influence sur la variabilité de la fertilité, il reste que celle-ci est surtout influencée par la gestion, en particulier par les apports d'engrais et de fumier (doses et types) effectués dans chaque champ au fil des ans. Sans une analyse de sol, il est difficile de prévoir les éventuelles carences en éléments nutritifs qui pourraient se répercuter sur les

rendements dans un champ en particulier.

Un programme d'échantillonnage des sols a justement pour but de déterminer la dose de fertilisant qui sera la plus profitable à l'ensemble ou à une partie d'un champ. Pour mettre au point un bon programme, il faut connaître les possibilités de rendement économique de la gestion, la variabilité probable à l'intérieur de chaque champ et les ressources disponibles.

Causes de la variabilité des sols

La variabilité découle des facteurs de formation du sol (matériaux d'origine, topographie, activité biologique, climat et passage du temps), ainsi que du travail du sol, de la fertilisation et des résidus de culture.

Les variations attribuables au travail du sol sont occasionnées par les charrues à versoirs et autres instruments aratoires qui emportent le sol du sommet des collines et le déposent à flanc de colline. Ces déplacements de sol engendrent des zones pauvres en matière organique, peu fertiles et à pH généralement élevé.

La variabilité de la fertilité des sols peut aussi être le résultat de plusieurs années d'application inégale d'engrais et de fumier. Les variations se trouvent amplifiées par la consolidation de petits champs en champs plus vastes. Les résidus de culture laissés à la surface du sol sans être épandus uniformément contribuent aussi à la variabilité de la fertilité des sols.

Stratégies d'échantillonnage

Échantillons composites

La stratégie la plus courante consiste à constituer un échantillon composite de chaque champ. Voir la figure 1-4. Habituellement, un échantillon composite représente une superficie ne dépassant pas 10 ha. Dans le but d'aplanir les variations observées à petite échelle, un même échantillon composite doit être constitué d'au moins 20 carottes, et ce, même si la superficie visée par l'échantillonnage est petite. Cette stratégie est indiquée si la culture a peu de valeur, que la fertilisation variable offre peu de potentiel de rendement, que la fertilité des sols varie peu ou que la fertilité de l'ensemble du champ est suffisamment grande pour qu'un apport d'engrais n'entraîne aucune réaction observable.

Dans le cas des sols très peu fertiles selon les résultats d'analyse, il est généralement prudent de supposer que la totalité du champ réagira à la fertilisation. Si les résultats d'analyse de l'échantillon composite révèlent une très grande fertilité, selon toutes probabilités et en dépit de variations considérables, il n'y a pas lieu de s'attendre à une réaction à la fertilisation, pas même dans les zones pour lesquelles les résultats d'analyse indiquent les plus faibles niveaux de fertilité.

Sous-échantillons

Dans les champs pour lesquels les analyses de sol révèlent des niveaux de fertilité de moyens à élevés, les cultures risquent davantage de réagir à la fertilisation variable. Encore faut-il trouver un moyen abordable de déterminer les zones appelées à réagir.

La méthode de sous-échantillonnage la plus courante consiste à prélever des échantillons équidistants dans le champ et à se servir d'un logiciel géostatistique pour prévoir la fertilité des intervalles entre les points de prélèvement. Cette méthode repose sur l'hypothèse que les échantillons représentent fidèlement la fertilité moyenne du sol au point de prélèvement et que les points de prélèvement sont suffisamment rapprochés les uns des autres pour donner une idée précise du schéma de variabilité. L'échantillonnage par unité de gestion fait par ailleurs de plus en plus d'adeptes. Cette pratique consiste à constituer un échantillon composite pour les parties d'un champ qui peuvent être gérées séparément.

L'intensité de l'échantillonnage est dictée, non pas par la variabilité de la fertilité des sols, mais par la valeur de la culture. Une grille de 1 ha est maintenant assez courante en Ontario, une plus grande

Nota :

Pour un exposé plus complet sur la mise en valeur des sols de l'Ontario, voir le fascicule *Pratiques de gestion optimales : Gestion du sol*, co-publié par le MAAARO et Agriculture et Agroalimentaire Canada.

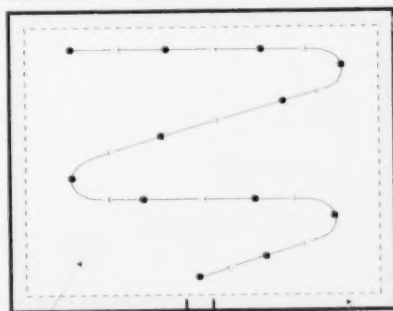
intensité d'échantillonnage pouvant s'appliquer à certaines cultures. On ne connaît pas l'intensité d'échantillonnage optimale pour toutes les situations.

Géoréférencement

Le géoréférencement, ou échantillonnage systématique des sols, a recours à la technologie du système mondial de localisation (GPS) et aux techniques des systèmes d'information géographiques (SIG) pour recueillir des données sur les échantillons de sol et les géoréférencer, c'est-à-dire les délimiter précisément par des coordonnées cartographiques. Voir la figure 1-5.

On appelle cette technique, méthode d'échantillonnage par

FIGURE 1-4. Échantillonnage composite

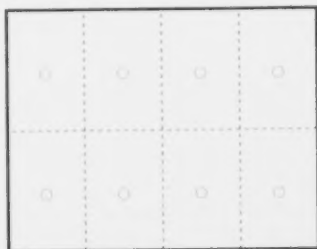


Ne pas prélever d'échantillons sous d'anciens enclos ou tas de fumier.

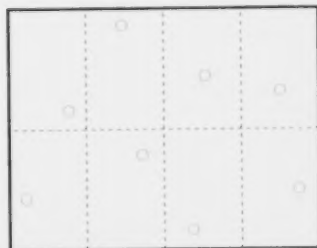
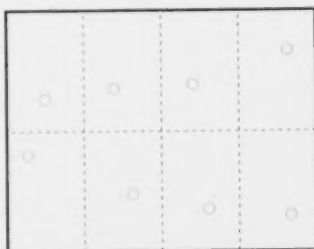
Éviter de prélever des échantillons dans des allées de voiture, des tournières et des dérayures.

FIGURE 1-5. Échantillonnage géoréférencé

aux points centraux de quadrilatères de 1 ha



à des points définis non alignés de quadrilatères de 1 ha



à des points aléatoires de quadrilatères de 1 ha



par sites spécifiques en fonction du type de sol

transect ou par quadrillage. Le plus souvent, l'espacement utilisé entre les points de prélèvement est de 1 ha. Même si cette information ne représente peut-être pas tous les détails d'un champ, elle peut faire ressortir des zones de gestion lorsqu'elle est combinée à d'autres données comme celles qu'on trouve sur des cartes de rendement ou des cartes topographiques.

Une pratique courante consiste à tracer les limites des champs à l'aide du GPS et d'un logiciel de cartographie. On superpose à la carte une grille destinée à guider le prélèvement des échantillons. On consigne le lieu de prélèvement de chaque échantillon. La répartition uniforme des points de prélèvement confère une validité statistique à l'échantillonnage.

Une fois les échantillons analysés, un SIG effectue l'appariement des concentrations d'éléments nutritifs et des coordonnées géographiques. Pour un champ de 40 ha, l'échantillonnage par quadrillage, qui divise le champ en quadrilatères de 1 ha, fournit 40 résultats d'échantillonnage au lieu des 4 résultats normalement fournis par un plan d'échantillonnage composite. Le fait de disposer de 10 fois plus d'information sous forme de cartes permet de mieux discerner la variabilité spatiale des sols et de prendre ainsi des décisions de gestion plus éclairées.

Conditions d'échantillonnage particulières

Semis direct

Les recommandations de fertilisation reposent sur les concentrations d'éléments nutritifs dans les 15 premiers centimètres de sol. Par conséquent, pour le dosage des éléments nutritifs, la profondeur d'échantillonnage est la même que l'on pratique le travail réduit du sol ou que l'on travaille le sol selon des méthodes traditionnelles. Il faut savoir toutefois que les systèmes de semis direct peuvent parfois occasionner une stratification des éléments nutritifs. Se reporter au chapitre 6, p. 149, pour plus d'information.

La situation est différente en ce qui a trait au pH du sol. Dans les systèmes de semis direct, l'épandage de l'azote à la surface du sol peut entraîner la formation d'une mince couche de sol acide. Pour vérifier si une telle couche s'est formée, prélever un échantillon distinct à faible profondeur (5 cm). Nota : Rajuster les recommandations de chaulage présentées au chapitre 4, p. 97, en fonction de cette faible profondeur d'échantillonnage.

Travail du sol par zone, en bandes ou sur billons et injection du fumier

Les champs qui font l'objet d'un travail du sol par zone, en bandes ou sur billons et d'une fertilisation en bandes ou de l'injection de fumier présentent des défis supplémentaires du fait que les apports d'éléments nutritifs sont concentrés dans

des parties du champ. La meilleure stratégie d'échantillonnage dans ces cas consiste à prélever deux fois plus de carottes qu'il est indiqué plus haut. En garantissant mieux le caractère aléatoire de l'échantillon, cette mesure contribue à procurer un meilleur échantillon.

Échantillonnage de diagnostic

Quand des carences nutritives sont soupçonnées d'être la cause d'un ralentissement de croissance observé dans des parties précises du champ, il est conseillé d'échantillonner ces zones séparément et de joindre à l'échantillon un échantillon témoin d'une zone où la croissance est normale. Pour qu'il soit bien représentatif de la zone échantillonnée, chaque échantillon composite doit être constitué d'au moins 8-10 carottes.

Pour en savoir plus long sur le diagnostic des problèmes à partir d'échantillons de sol, se reporter à la page 15.

Échantillonnage de tissus végétaux

Les agriculteurs font l'échantillonnage de tissus végétaux qu'ils prélèvent :

- d'arbres fruitiers vivaces et de vignes afin de préciser les recommandations de fertilisation;
- de cultures annuelles afin de diagnostiquer des problèmes de fertilité, particulièrement des carences en oligo-éléments.

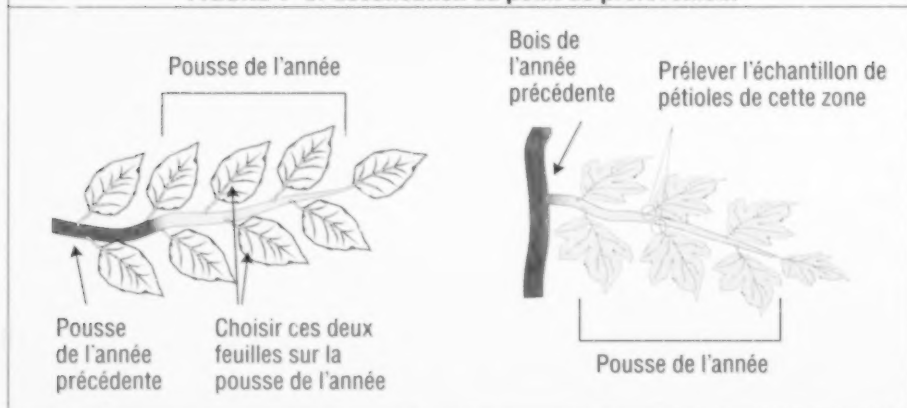
Arbres fruitiers et vignes

Dans le cas des arbres fruitiers, prélever les échantillons de tissus entre le 15 et le 31 juillet. Dans le cas des vignes, prélever les échantillons de pétioles entre le 1^{er} et le 15 septembre. Ce sont les dates où les feuilles à maturité ont des teneurs en éléments nutritifs normales, teneurs auxquelles celles des échantillons pourront être comparées en laboratoire.

Échantillonner séparément chaque cultivar et chaque parcelle d'arbres fruitiers. Prélever au moins 100 feuilles pour chaque échantillon. Pour obtenir un échantillon représentatif, prélever 5 feuilles sur chacun de 20 arbres. Ne pas combiner feuilles saines et feuilles malades. Voir la figure 1-6.

Dans l'échantillonnage des vignes à raisins, ne prélever que les pétioles de feuilles à maturité. Échantillonner séparément les cultivars différents et les parcelles d'âges différents. Idéalement, prélever les pétioles d'un certain nombre de rangées différentes de la parcelle. Prélever au moins 100 pétioles par échantillon. Dans le cas des hybrides *Vinifera* et français, prélever 150 pétioles.

FIGURE 1-6. Localisation du point de prélèvement



Cultures de plein champ

Prélever au hasard à la grandeur du champ des échantillons provenant d'au moins 50 plants. Le laboratoire a besoin d'un échantillon d'un poids frais minimal de 250 g.

Consulter le tableau 1-1, *Calendrier et parties de plantes recommandés pour l'échantillonnage de tissus*, pour connaître le moment où prélever les échantillons afin que ceux-ci puissent être comparés aux valeurs normales. Des calendriers d'échantillonnage plus détaillés ont été établis pour de nombreuses cultures légumières. Consulter l'édition courante de la publication 363F du MAAARO, *Recommandations pour les cultures légumières*.

Erreurs les plus fréquentes à éviter dans le prélèvement d'échantillons de tissus :

- prélèvement d'une quantité insuffisante de matériel;
- prélèvement de tissus chlorotiques ou morts, ou de feuilles endommagées par des insectes;

- prélèvement de tissus végétaux contaminés par du sol;
- envoi de l'échantillon dans des sacs de plastique.

Ne jamais prélever de tissus ayant reçu une application d'engrais foliaire.

Échantillonnage hors des périodes recommandées

L'échantillonnage doit parfois se faire hors des périodes recommandées, dans le but de diagnostiquer des problèmes dans le champ. Les concentrations d'éléments nutritifs ne correspondent alors pas aux concentrations prévisibles en temps normal, ce qui oblige à comparer les concentrations observées dans les zones atteintes à celles qu'on observe dans les zones saines. Pour plus d'information sur le diagnostic des problèmes à partir d'échantillons de tissus végétaux, voir p. 15.

**TABEAU 1-1. Calendrier et parties de plantes recommandés
pour l'échantillonnage de tissus**

	Moment	Partie de la plante
Mais	stade 3-5 feuilles	plante entière (zinc et phosphore seulement)
	apparition des soies	tiers médian de la feuille de l'épi
Soya	première floraison	feuille supérieure entièrement déployée (3 folioles + pétiole)
Céréales	épiaison	deux feuilles supérieures
Cultures fourragères	bouton floral tardif	toute la partie aérienne
Haricots comestibles	première floraison	feuille supérieure entièrement déployée (3 folioles + pétiole)
Pomme de terre	début, milieu ou fin de saison	pétiole de la 4 ^e feuille en bas de l'apex
Tomate	début de floraison	pétiole de la 4 ^e feuille en bas de l'apex
Brocoli, chou-fleur	début de la pommaison	nervure médiane de jeunes feuilles à maturité
Choux	pommaison	nervure médiane de la feuille extérieure
Carotte	mi-croissance	pétiole des jeunes feuilles à maturité
Céleri	mi-croissance	pétiole des dernières feuilles déployées
Laitue	pommaison	nervure médiane de la feuille extérieure
Oignon	au moins 3 fois par saison	feuille la plus grande
Épinard	mi-croissance	pétiole des jeunes feuilles à maturité
Betterave à sucre	douze semaines	feuille à maturité la plus jeune
Arbres fruitiers	deux dernières semaines de juillet	feuilles entièrement déployées au delà du point médian de la pousse de l'année
Bleuet	mi-août	feuilles à maturité entièrement déployées, pétioles compris
Raisin	du 1 ^{er} au 15 septembre	pétioles de la feuille opposée à la grappe
Framboise	pieds aux fruits mûrs depuis peu	feuilles entièrement déployées
Fraise	fin juin (fraisiers fructifères), mi-août (fraisiers non fructifères)	folioles entièrement déployées récemment parvenus à maturité seulement (sans le pétiole)
Tabac	écimage	dixième feuille depuis la cime

Expédition

Placer les échantillons de feuilles ou de pétioles dans des sacs de papier; ne pas utiliser de sacs de plastique, car les échantillons risqueraient de ressuer et de pourrir. Étiqueter chaque sac de façon à pouvoir établir une correspondance entre les résultats d'analyse et la parcelle d'où provient l'échantillon.

Tenue de registres

Pour chaque parcelle échantillonnée, tenir des registres précisant le cultivar et l'année. Conserver les résultats d'analyse de chaque parcelle avec les registres des applications de fertilisants, des conditions météorologiques et des rendements. L'information fournie permet de dégager des tendances dans les niveaux de fertilité.

Échantillonnage du fumier

L'échantillonnage du fumier permet aux producteurs de déterminer :

- les quantités à épandre; et
- les apports d'éléments nutritifs supplémentaires à prévoir.

Échantillonnage du fumier liquide

Dans le cas du fumier liquide, prélever un échantillon à chaque vidange de la structure de stockage jusqu'à ce qu'une tendance se dessine. Pour une même structure de stockage, la composition du fumier est différente selon que la vidange se fait au printemps ou à la fin de l'été.

Au moment de l'échantillonnage, agiter le contenu de toute la structure de stockage. Dans un seau en plastique, prélever des échantillons à différentes profondeurs, au fur et à mesure de la vidange. Bien mélanger de dix à vingt de ces échantillons, puis transférer une partie du mélange dans un contenant en plastique. Ne remplir le contenant qu'à moitié, pour éviter les risques d'une explosion consécutive à l'accumulation de gaz. Bien sceller le contenant et l'insérer dans un sac de plastique étanche. Entreposer l'échantillon au frais jusqu'au moment de l'expédier.

Échantillonnage du fumier solide

Dans le cas du fumier solide, prélever un échantillon à chaque vidange de la structure de stockage, jusqu'à ce qu'une tendance se dégage. Par la suite, l'échantillonnage peut se faire à intervalles de quelques années ou à l'occasion d'un changement important dans la provenance du fumier ou la conduite de l'élevage, notamment des modifications apportées à la ration, à la litière ou aux méthodes de stockage.

L'échantillonnage aléatoire du fumier solide se fait plus difficilement. Prélever un échantillon de fumier (fourchée pleine) de chaque chargement à bord du véhicule d'épandage ou en différents points du tas de fumier et le déposer sur une surface propre en béton ou en contre-plaqué. Hacher le fumier à l'aide d'une pelle ou d'une fourche et mélanger le mieux possible les

échantillons. Séparer l'échantillon composite en quatre portions et en jeter trois.

Continuer à mélanger et à séparer l'échantillon composite jusqu'à ce qu'il en reste juste assez pour remplir un contenant d'expédition ou un contenant en plastique d'environ un demi-litre.

Fermer le contenant hermétiquement, l'insérer dans un sac de plastique et le conserver au frais jusqu'au moment de l'expédier.

Expédier les échantillons de fumier au début de la semaine, afin qu'ils parviennent au laboratoire avant la fin de semaine.

La composition du fumier varie d'une ferme à l'autre.

Plusieurs facteurs influencent la quantité d'éléments nutritifs présents dans le fumier. Certains types d'élevage produisent du fumier plus riche que d'autres en éléments nutritifs. Ainsi, le fumier de volaille renferme-t-il davantage de tous les éléments nutritifs que le fumier des élevages laitiers. Parmi les élevages de volaille, les élevages de poulets à griller produisent en général un fumier plus riche en éléments nutritifs, particulièrement en phosphore et en potassium, que les élevages de poudeuses.

La teneur en éléments nutritifs du fumier reflète habituellement le type de ration offerte aux animaux. Ainsi, le fumier des jeunes animaux auxquels on sert des aliments concentrés affiche des concentrations plus élevées d'éléments nutritifs que

le fumier des animaux auxquels on sert des aliments de moindre qualité. Des rations bien équilibrées procurent un maximum de rendement moyennant un minimum de rejets d'éléments nutritifs dans le fumier.

La quantité et le type de litière influencent les concentrations d'éléments nutritifs dans le fumier (dilution) et parfois même la quantité d'azote biodisponible. Les copeaux de bois affichent un ratio carbone:azote plus élevé (500:1) que la paille de céréales (80:1). Plus le ratio carbone:azote est élevé, plus grande est la quantité d'azote apte à se fixer pendant la dégradation des composés carbonés, ce qui influence la quantité d'azote biodisponible.

L'ajout au fumier de liquide de dilution, quel qu'il soit, réduit la concentration d'éléments nutritifs dans le fumier. Si l'on ajoute au fumier d'un élevage laitier, les eaux de lavage de laiterie et les eaux de ruissellement des enclos, il faudra augmenter de beaucoup les taux d'épandage pour obtenir une fertilisation équivalente à celle que procurerait, par exemple, l'épandage d'un fumier produit par une porcherie dotée de trémies-abreuvoirs.

Les pertes attribuables au stockage peuvent avoir de grandes répercussions sur la teneur en éléments nutritifs du fumier. Les eaux qui s'écoulent d'un tas de fumier solide peuvent emporter avec elles de grandes quantités d'azote et de potassium, laissant le gros du phosphore fixé aux matières solides. Non seulement ces eaux de ruissellement constituent-elles un danger

pour l'environnement, mais elles représentent aussi un gaspillage de ressources.

Échantillonnage pour diagnostic des carences et toxicités dans le champ

Pour expliquer la présence de zones problématiques dans un champ, il faut garder l'esprit ouvert et étudier toutes les données disponibles. Au cours des opérations de dépistage, observer :

- les différences dans la structure, la texture, les horizons, le compactage et les résultats d'analyse de la fertilité du sol;
- les végétaux pour connaître leur stade phénologique, les cultivars, les dates de semis, les profondeurs de semis, la couleur des tissus pouvant révéler des carences et des maladies, la croissance racinaire;
- les effets des traitements phytosanitaires et les signes révélateurs de la présence d'ennemis des cultures, tels que mauvaises herbes, ravageurs et maladies.

Observer globalement les cultures dans la région. Examiner au moins l'équivalent d'une concession pour voir si le problème est très localisé ou s'il est répandu.

Observer d'abord le champ au complet avant d'inspecter un site spécifique. Si possible, comparer les zones saines et les zones problématiques. S'attarder aux configurations qui pourraient aider à cerner la

cause du problème de croissance. Par exemple :

- **Bandes ou motifs rectangulaires.** La cause peut être une mauvaise application, surtout si les bandes ou motifs sont présents à la grandeur du champ.
- **Maladies amenées par des vecteurs.** Le virus de la jaunisse nanisante de l'orge, par exemple, peut être propagé par des insectes. Il peut aussi être emporté par des vents dominants et laisser dans le champ un motif qui rappelle la neige emportée par le vent. Lorsque les endroits situés du côté ombragé des arbres ont été épargnés, il y a lieu de soupçonner un problème amené par des vecteurs.
- **Zones compactées par les roues des véhicules.** La circulation des véhicules peut avoir des effets positifs ou négatifs. Normalement, les roues des véhicules compactent le sol et nuisent à la croissance. En général, les zones compactées peuvent être mesurées et comparées à l'espacement des roues de la machinerie agricole. Il arrive qu'un tassement léger du sol occasionné par la circulation des véhicules améliore le contact sol-semence et favorise une levée plus hâtive, surtout dans les sols très meubles.

Les configurations peuvent être difficiles à déceler si elles apparaissent et disparaissent. Même si les problèmes ne sont pas toujours graves, il suffit parfois d'une sim-

ple modification dans les sols ou les conditions météorologiques pour que la situation s'aggrave. Par exemple, le nématode à kyste du soya peut sembler absent d'un champ pendant des années malgré une augmentation graduelle des populations. Le nématode peut se manifester dans les sections du champ soumises à un facteur de stress comme le compactage du sol.

Examiner les registres de production pour repérer les tendances générales touchant le rendement et la qualité. Le fait qu'un problème se manifeste dans toutes les cultures comprises dans la rotation ou dans une seule peut fournir une indication quant à la cause du problème.

Prélèvement d'échantillons de sol à des fins de diagnostic

Quand on soupçonne qu'une carence nutritive est la cause d'un ralentissement de croissance ou d'une réduction de rendement dans une partie du champ, il est important d'échantillonner ces zones séparément afin de confirmer le diagnostic. Aux fins de comparaison, échantillonner également les zones saines. Les carences nutritives dont souffrent les végétaux peuvent être dues soit à une concentration inadéquate d'éléments nutritifs dans le sol, soit à une masse racinaire restreinte qui nuit au prélèvement des éléments nutritifs. Tout diagnostic doit tenir compte de ces deux facteurs.

Tenir un registre détaillé de l'emplacement des sites problématiques. Continuer d'échantillonner les

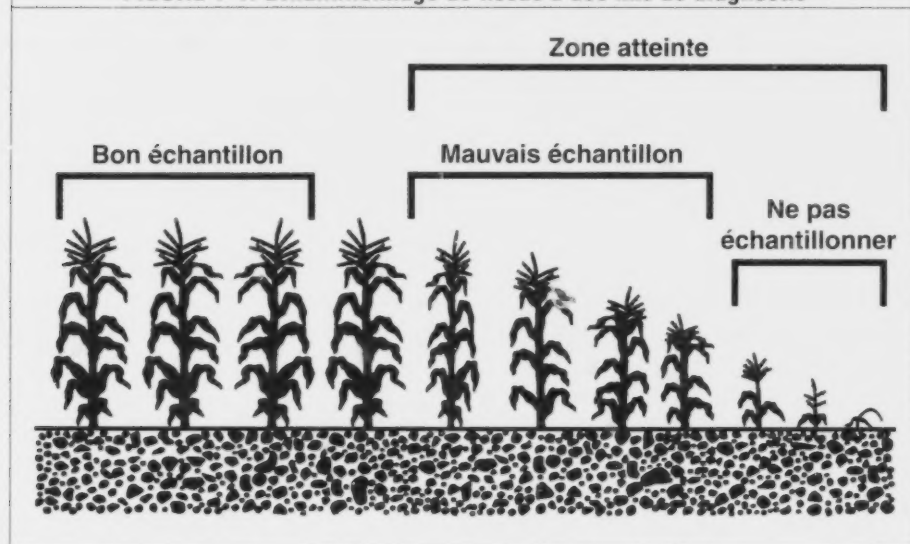
zones problématiques chaque année ou tous les deux ans jusqu'à ce que la fertilité du sol soit rétablie.

Prélèvement d'échantillons de tissus à des fins de diagnostic

Les échantillons de tissus peuvent être précieux pour confirmer des carences nutritives, notamment des carences en oligo-éléments. Recourir à de bonnes techniques d'échantillonnage, telles qu'elles sont décrites plus haut, et veiller à prélever suffisamment de tissus végétaux à des fins d'analyse. Échantillonner à la fois les zones où la croissance est normale et les zones problématiques. Prélever des échantillons de tissus de plants avoisinant les plants morts et non les tissus des plants morts. Voir la figure 1-7. Prélever aux mêmes endroits des échantillons de sol afin de vérifier le pH du sol et d'évaluer la fertilité du sol.

Il peut arriver que l'échantillonnage de diagnostic doive se faire hors des moments recommandés. Les concentrations d'éléments nutritifs ne correspondent alors pas aux concentrations prévisibles en temps normal, ce qui oblige à comparer les concentrations observées dans les zones atteintes à celles qu'on observe dans les zones saines. Des concentrations critiques d'éléments nutritifs dans les tissus végétaux peuvent parfois prêter à confusion, car ces concentrations peuvent être élevées dans des plants sains du simple fait que les tissus ne sont pas assez abondants pour diluer les éléments nutritifs.

FIGURE 1-7. Échantillonnage de tissus à des fins de diagnostic



Bibliographie

- Oloya, T.O., C.F. Drury et K. Reid, 2007. « Effect of soil storage on soil extractable ammonium and nitrate levels », dans *Canadian Journal of Soil Science* (en révision).
- Potash & Phosphate Institute, 2003. *Soil Fertility Manual*, PPI, Norcross, GA 30092-2837 USA.
- Rehm, George W., Antonio Mallarino, Keith Reid, Dave Franzen, John Lamb, 2002. *Soil Sampling for Variable Rate Fertilizer and Lime Application*, NCR-13 Committee, offert par l'University of Minnesota. (www.extension.umn.edu/distribution/cropsystems/DC7647.html).

2 ANALYSES DE SOLS, DE TISSUS VÉGÉTAUX ET DE FUMIER

Pour que les cultures agricoles soient rentables, il faut tirer parti des éléments nutritifs qui sont présents dans les sols et, au besoin, combler les besoins des cultures par des apports d'éléments nutritifs suffisants dans chaque champ. Comme les sols affichent des niveaux de fertilité très variables, les quantités de fertilisants qui leur sont nécessaires varient aussi considérablement. Les analyses de sols et de tissus végétaux sont des moyens de prévoir les doses de fertilisants optimales pour une culture donnée dans un champ précis.

Analyses de sols

Manutention et préparation

À l'arrivée des échantillons au laboratoire, les employés :

- vérifient les demandes d'analyse et les échantillons pour s'assurer qu'ils correspondent;
- vérifient si le nom du client, les codes d'identification des échantillons et les demandes sont clairs;
- fixent les codes d'identification aux échantillons et aux demandes d'analyse;
- préparent les échantillons en vue de leur séchage au four en ouvrant les boîtes ou les sacs et en les plaçant sur des grilles de séchage;

- mettent les échantillons au four à 35 °C (95 °F) jusqu'à ce qu'ils soient secs (1-5 jours) (sauf les échantillons destinés au dosage des nitrates, qui doivent être analysés sans séchage);
- broient les échantillons après séchage jusqu'à ce qu'ils passent à travers un tamis de 2 mm d'ouverture de maille pour les débarrasser des pierres et des résidus de culture;
- emportent les échantillons au laboratoire, où les sous-échantillons sont analysés.

Résultats d'une analyse de sol

L'information fournie par l'analyse de sol varie d'un laboratoire et à l'autre, mais également, au sein d'un même laboratoire et d'une analyse à l'autre, selon le but de l'analyse. Les différences sont encore plus grandes dans la façon de présenter l'information. Une lecture attentive des rubriques est parfois nécessaire pour trouver l'information pertinente. Il reste que le dosage de certains éléments figure sur presque tous les rapports d'analyse de sol.

Il en va de même du pH du sol. Même s'il ne s'agit pas d'un élément nutritif, le pH, qui indique le degré d'acidité ou d'alcalinité du sol, influence beaucoup la biodisponibilité des éléments nutritifs et la croissance des cultures. Le rapport fournit également le pH tampon des

Utilité de l'analyse de sol	Utilité de l'analyse des tissus
préciser les besoins en fertilisants	préciser les besoins en fertilisants des cultures fruitières vivaces
déterminer le pH du sol et les besoins en chaux	diagnostiquer des carences nutritives
diagnostiquer des problèmes cultureux	diagnostiquer des cas de toxicité des éléments nutritifs
déterminer la pertinence d'épandre des biosolides	valider les programmes de fertilisation
déterminer la pertinence de traitements herbicides particuliers	

sols acides, pour préciser les besoins de chaulage.

Les principaux éléments dosés sont le phosphore, le potassium et le magnésium. Ce sont les éléments nutritifs qui, outre l'azote, sont le plus souvent épandus comme fertilisants. Certains laboratoires font aussi le dosage du calcium. Le dosage de l'azote des nitrates est réalisé à partir d'un échantillon de sol distinct prélevé plus profondément.

Le dosage des oligo-éléments n'est pas aussi fréquent, mais se fait de plus en plus. Pour le zinc et le manganèse, il existe des analyses fiables qui précisent les besoins des cultures, ce qui fait que le dosage de ces éléments est presque systématique. Bien que les dosages d'autres oligo-éléments (cuivre, fer, bore) ne soient pas aussi fiables, certains laboratoires les incluent dans le rapport d'analyse. En Ontario, peu de laboratoires font le dosage du soufre, même si le dosage de cet élément est courant dans l'Ouest canadien.

De plus en plus de laboratoires analysent systématiquement la

teneur du sol en matière organique. Cette donnée sert souvent à juger de la qualité du sol et influence aussi les recommandations d'herbicides. Pour les sols qu'on soupçonne d'être trop riches en sels, il est possible de commander une analyse de leur conductivité électrique. Le tableau 2-1, *Données figurant sur un rapport d'analyse de sol*, donne plus de détails sur l'information qui figure normalement sur un rapport d'analyse de sol.

Présentation des résultats

La présentation des résultats des analyses de sol n'est pas uniforme, d'autant plus si l'on traite avec des laboratoires situés à l'extérieur de l'Ontario. La plupart des laboratoires ontariens expriment les résultats en milligrammes par litre de sol (mg/L), ce qui revient à donner le poids des éléments nutritifs extraits d'un volume donné de sol. Cette façon de présenter l'information s'apparente aux résultats exprimés en milligrammes par kilogramme de sol (mg/kg), une mesure du poids par unité de poids, qui équi-

vaut à des parties par millions (ppm).

Certains laboratoires, surtout aux États-Unis, expriment les résultats des analyses de sol en livres de l'élément assimilable par acre, ce

qui prête à confusion puisque les résultats ne sont alors pas exprimés en fonction d'une quantité précise. La couche arable sur une superficie de 1 acre pèse environ 2 millions de livres. Il est donc possible de

TABLEAU 2-1. Données figurant sur un rapport d'analyse de sol

Information générale	
Code d'identification de l'échantillon	Ce code permet au producteur d'établir un lien entre les résultats d'analyse et le site de prélèvement de l'échantillon.
Numéro attribué par le laboratoire	Ce numéro permet au labo de faire le suivi de l'échantillon tout au long du processus d'analyse.
Valeurs analysées	
pH du sol	Tout rapport d'analyse doit inclure le pH du sol mesuré dans une pâte sol-eau saturée.
pH tampon	Mesure effectuée uniquement pour les sols acides (en général pH < 6,0).
Phosphore	En Ontario, les laboratoires accrédités doivent faire ce dosage par la méthode Olsen, qui utilise comme réactif du bicarbonate de sodium. Certains laboratoires incluent aussi les résultats obtenus par les méthodes d'extraction Mehlich ou Bray. Le rapport doit toujours préciser la méthode et les unités utilisées.
Potassium, magnésium (calcium, sodium)	Les cations sont mesurés par un processus d'extraction à l'acétate d'ammonium, les résultats étant exprimés en mg par litre de sol. Il arrive que les dosages du calcium et du sodium soient aussi inclus.
Azote des nitrates	L'azote des nitrates n'est pas systématiquement dosé lors des analyses de sol, étant donné que l'interprétation des résultats n'est valide que si l'échantillon a été prélevé plus profondément au moment des semis ou avant l'application de fertilisant en bandes latérales.
Soufre	Le dosage du soufre est facultatif, car l'interprétation des résultats est difficile. Le dosage se fait à partir d'échantillons prélevés plus profondément, comme dans le cas de l'azote des nitrates.
Oligo-éléments	Le Mn et le Zn sont les seuls oligo-éléments dont le dosage se fait au moyen d'une analyse reconnue par le MAAARO. Il se peut que le rapport d'analyse fasse état des concentrations d'autres oligo-éléments, mais selon des recherches menées en Ontario, ces concentrations sont peu révélatrices de la biodisponibilité réelle de ces oligo-éléments.
Matière organique	Cette analyse est facultative. Bien vérifier si le résultat indique la teneur en matière organique ou la teneur en carbone organique.
Conductivité électrique	Cette analyse facultative indique si la salinité du sol est excessive.
Les cotes attribuées aux valeurs obtenues tiennent compte à la fois du résultat d'analyse et de la culture envisagée.	

TABLEAU 2-1. Données figurant sur un rapport d'analyse de sol (suite)

Valeurs dérivées	
Indices de zinc et de manganèse	Ces indices sont calculés à partir des résultats d'analyse et du pH du sol.
Capacité d'échange cationique (CÉC) et taux de saturation en bases	Ces valeurs sont établies à partir du pH du sol et des résultats d'analyse pour les éléments suivants : K, Mg et Ca. Les résultats peuvent être faussés en présence de chaux libre dans des sols à pH élevé. Les recommandations de fertilisation ontarienne ne sont pas influencées par la CÉC ni par le taux de saturation en bases.
Recommandations de fertilisation	
Recommandations de fertilisation et de chaulage	Ces recommandations figurent sur le rapport d'analyse si l'on a pris soin d'indiquer au laboratoire quelle culture sera pratiquée. Les résultats d'analyse peuvent servir à déterminer les apports d'éléments nutritifs nécessaires à des cultures précises, à partir des tableaux de recommandations propres à ces cultures.
Adaptation des recommandations de fertilisation	Pour peu que l'information ait été communiquée au laboratoire, si le champ a fait l'objet d'un épandage de fumier ou d'une culture de légumineuses, les changements à apporter aux recommandations de fertilisation par suite de ces opérations seront indiqués.
Remarques et avertissements	Certains rapports fournissent de l'information supplémentaire compte tenu de la culture envisagée et des résultats d'analyse.

convertir les résultats en parties par million en les divisant par 2. Par exemple, si l'analyse de sol révèle pour le phosphore un dosage de 120 lb/ac, en divisant par 2, on obtient 60 ppm. Au Québec, les résultats sont exprimés en kg/ha.

$$(\text{kg/ha} \times 0,455 = \text{ppm})$$

Il est également important de connaître les agents d'extraction qui sont utilisés pour effectuer l'analyse de sol.

Agents d'extraction

L'analyse des sols dans le but de déterminer les besoins en fertilisants est une opération complexe, car il s'agit d'évaluer quelle sera, dans un sol donné, la quantité d'éléments nutritifs qui seront biodisponibles pour un large éventail de cultures tout au long de la saison de

croissance. L'exercice serait simple si tous les éléments nutritifs étaient entièrement assimilables par les végétaux ou si le prélèvement des éléments nutritifs se faisait d'une seule façon. Toutefois, le sol est un substrat extrêmement complexe qui est le siège d'une multitude d'interactions physiques, chimiques et biologiques qui ont cours simultanément. Les interactions qui s'opèrent à l'interface sol-racine sont encore plus complexes et encore moins bien connues.

Le phosphore illustre bien cette complexité. Dans le sol, le phosphore prend le plus souvent la forme de phosphate. Dans les sols allant de neutres à alcalins, le phosphate se combine au calcium. Dans les sols allant de neutres à acides, il se lie au fer ou à l'aluminium. Le

phosphate réagit également à divers minéraux argileux ou composés organiques pour former des combinaisons complexes et peut être présent dans la fraction organique du sol ou dans sa biomasse. Or, pour mesurer toutes ces formes de phosphore que les végétaux assimilent plus ou moins bien par divers processus, nous disposons d'une seule analyse chimique rapide.

Chaque analyse chimique comporte deux étapes. Il y a d'abord la conversion du composé à analyser en une forme mesurable. Puis, il y a l'analyse à proprement parler. Comme il s'agit de déterminer uniquement la fraction assimilable de l'élément nutritif présent dans le sol, la première étape diffère d'une analyse chimique normale. D'abord, on traite le sol à l'aide d'un agent d'extraction, afin d'extraire la fraction de l'élément nutritif qui est biodisponible. C'est cet extrait que l'analyse permet de mesurer.

Choix d'un agent d'extraction

Pour être utile à la détermination des besoins des cultures, l'agent d'extraction doit déboucher sur l'estimation la plus juste possible de la quantité de l'élément nutritif qu'il faudra apporter à la culture pour qu'elle produise un rendement optimal. Comme cette estimation est difficile à faire, l'évaluation des agents d'extraction s'effectue le plus souvent par la mesure de leur capacité à évaluer la quantité de l'élément nutritif qui est biodisponible dans les différents sols soumis au laboratoire ou présents dans une région. Il faut aussi que l'agent

d'extraction soit relativement peu coûteux, qu'il soit facile d'emploi, qu'il comporte le moins possible de produits chimiques toxiques ou corrosifs et qu'il se prête à des méthodes d'utilisation reproductibles d'un laboratoire à l'autre.

Aucun agent d'extraction n'extraît du sol exactement la fraction de l'élément nutritif qui est assimilable par les végétaux. Chacun comporte ses points forts et ses points faibles en fonction du type de sol. Le choix d'un agent d'extraction doit être guidé par son utilité pour le sol à l'étude et par la disponibilité de données qui permettent d'établir une corrélation avec la réaction des cultures. Se reporter au chapitre 6 pour plus de détails.

Au commencement, l'eau

Le premier agent d'extraction utilisé dans les analyses de sol a été l'eau. L'eau n'extrayait que la fraction de l'élément nutritif présente dans la solution de sol. Même si cette fraction est immédiatement assimilable par les végétaux, elle ne représente qu'une infime partie seulement de la quantité totale de l'élément nutritif biodisponible présent dans le sol. Cette fraction est peu révélatrice de la quantité totale de l'élément nutritif en réserve dans le sol, étant donné que cette quantité varie considérablement d'un sol à l'autre.

Ayant constaté que les racines excrètent des acides faibles à leur surface, les chercheurs se sont tournés vers les solutions acides. Depuis, les agents d'extraction n'ont cessé de se multiplier et de se diversifier, au fur et à mesure que les chercheurs

ont voulu expérimenter des agents d'extraction plus fiables et plus compatibles pour un vaste éventail de conditions de sols. Ces agents d'extraction portent souvent le nom du chercheur qui les a mis au point ou de l'ingrédient principal de la solution d'extraction.

Variation régionale

L'agent d'extraction choisi varie de région en région, étant donné que l'agent le plus approprié dépend en grande partie des sols qu'on retrouve dans la région.

Voici ce qu'il faut faire avant de choisir un agent d'extraction ou une méthode d'analyse de sol : prélever des échantillons d'une vaste gamme de sols dans l'ensemble de la région; cultiver des végétaux dans chaque sol; récolter ces végétaux, les peser et les analyser pour déterminer les quantités d'éléments nutritifs prélevées des différents sols; utiliser différents agents d'extraction pour extraire les éléments nutritifs des sols; analyser les extraits; comparer enfin les résultats d'analyse des extraits aux quantités assimilées par les plantes (mesure de la capacité du sol à fournir aux végétaux des éléments nutritifs biodisponibles). L'agent d'extraction choisi pour une région est normalement celui qui donne les résultats les plus proches des quantités d'éléments nutritifs assimilées par les végétaux.

On classe généralement les agents d'extraction utilisés pour le dosage du phosphore dans les sols selon

qu'il s'agit de solutions acides ou de solutions alcalines. Les solutions acides (Bray et Mehlich) sont en général utilisées dans les régions où les sols sont pour la plupart acides. Dans les sols alcalins, ces agents d'extraction sous-évaluent les concentrations de phosphore assimilable, du fait que l'acide est en partie neutralisé par la chaux libre présente dans le sol. Voir le tableau 2-2.

Les agents d'extraction alcalins (bicarbonate de sodium, bicarbonate d'ammonium) donnent des résultats plus uniformes dans une vaste gamme de pH du sol. Le potassium, le calcium et le magnésium sont extraits à l'aide d'un autre cation semblable, habituellement l'ammonium, pour les retirer du complexe d'échanges cationiques. On peut extraire les oligo-éléments du sol à l'aide d'un chélateur ou d'un acide faible.

Une fois l'agent d'extraction choisi, on effectue des essais en plein champ pour préciser le taux d'application optimal de fertilisant en fonction des différentes concentrations d'éléments nutritifs dans le sol et en fonction des différentes cultures. L'établissement de ces données propres à chaque agent d'extraction coûte cher. Les laboratoires d'analyse de sol sont réticents à changer d'agent d'extraction, à moins qu'il n'y ait un avantage réel à le faire.

**TABLEAU 2-2. Corrélation entre le P extractible et le P
assimilé en conditions contrôlées de serre**

Agent d'extraction	Corrélation pour tous les sols (88 sols) (r^2)*			
		pH > 7,0 (46 sols)	pH 6,1-7,0 (30 sols)	pH < 6,1 (12 sols)
Bicarbonate de sodium	0,74	0,79	0,64	0,87
Bicarbonate d'ammonium	0,73	0,71	0,63	0,95
Bray-Kurtz P1	0,54	0,52	0,33	0,73
Bray-Kurtz P2	0,65	0,60	0,40	0,90
Mehlich III	0,66	0,57	0,40	0,93

* Une corrélation r^2 de 1,00 signifie une correspondance complète.

Source : T.E. Bates, « Prediction of phosphore availability from 88 Ontario soils using five phosphorus soil tests », communication dans *Soil Science Plant Analysis* 21 (1990) : 1009-1023.

Caractère non interchangeable des résultats obtenus avec des agents d'extraction différents

Les concentrations obtenues pour un même sol peuvent varier considérablement selon l'agent d'extraction utilisé. Ainsi, le dosage du phosphore à l'aide d'une solution de bicarbonate de sodium peut donner un résultat la moitié moins grand, ou plus petit encore, que celui qu'on obtient avec l'agent d'extraction Bray P1. Toutefois, dans des conditions convenables, les deux peuvent fournir un indice de la biodisponibilité du phosphore. Les difficultés surgissent si l'on utilise les données de l'une de ces analyses avec les tableaux de recommandations de fertilisation élaborés pour l'autre analyse.

Les résultats obtenus par différents agents d'extraction ne sont pas parfaitement comparables les uns aux autres. Ordinairement, si un agent d'extraction permet d'observer

une augmentation de la concentration d'un élément nutritif, les autres agents d'extraction le font également, mais il y a des exceptions. Même lorsque des augmentations constantes sont observées avec différents agents d'extraction, souvent, les corrélations ne sont pas les mêmes lorsque les concentrations d'éléments nutritifs dans le sol sont faibles que lorsqu'elles sont fortes. Pour cette raison, il faut éviter de convertir les valeurs obtenues avec différents agents d'extraction. Il faut savoir quel agent d'extraction a été utilisé et se reporter aux tableaux de recommandations de fertilisation élaborés pour cet agent d'extraction.

Contrôle de la qualité

Comme pour tout procédé chimique, un contrôle de la qualité est nécessaire pour garantir la précision des résultats obtenus par les laboratoires. En Ontario, ce contrôle est assuré par un programme

d'accréditation géré par le ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales. Les détails du programme évoluent au fil du temps, mais les principes fondamentaux demeurent les mêmes.

Objectifs d'un programme d'accréditation des laboratoires

Les objectifs d'un programme d'accréditation des laboratoires sont les suivants :

- faire en sorte que les résultats d'analyse de chaque échantillon de sol soumis à un laboratoire soient conformes aux attentes pour le procédé analytique visé;
- assurer l'uniformité des résultats obtenus par les laboratoires accrédités;
- encourager l'utilisation, dans les analyses de sol, des agents d'extraction pour lesquels il existe amplement de données sur les réactions des cultures à différents dosages dans les sols de l'Ontario;

- promouvoir le recours aux laboratoires accrédités, car ceux-ci effectuent des analyses normalisées suivant les règles de l'art;
- promouvoir le respect des recommandations de fertilisation qui s'appuient sur la recherche effectuée en Ontario;
- permettre aux laboratoires qui satisfont aux critères d'adhérer au programme d'accréditation.

Les procédés analytiques utilisés dans un laboratoire constituent la base de tout programme de contrôle de la qualité. Pour s'assurer que les résultats d'analyse sont cohérents, un laboratoire doit toujours inclure un ou deux échantillons de sol étalon dans chaque série d'analyses. Le laboratoire doit aussi préparer avec soin des solutions étalons et les utiliser pour étalonner les appareils de mesure et en vérifier périodiquement l'étalonnage. Il lui faut aussi tenir des registres précis qui lui permettent non seulement de démontrer son rendement au fil

Méthodes d'analyse de sol reconnues par le MAAARO

Analyse	Méthode
pH du sol	Pâte saturée
Besoins en chaux	pH tampon SMP
Phosphore	Bicarbonate de sodium (Olsen)
Potassium, magnésium	Acétate d'ammonium
Indice de zinc	Solution DTPA, corrigée en fonction du pH du sol
Indice de manganèse	Acide phosphorique, corrigée en fonction du pH du sol
Nitrates du sol	Extraction au chlorure de potassium

Historique du programme ontarien d'accréditation des laboratoires d'analyse de sol

Suite à une proposition faite en 1989, au lieu d'un seul laboratoire accrédité par le MAAARO pour effectuer des analyses de sols, d'aliments pour animaux, de tissus végétaux et de substrats de culture en serre, tous les laboratoires qui démontrent leur aptitude à réaliser de telles analyses peuvent être accrédités. C'est ainsi que 33 laboratoires ont demandé l'accréditation.

Le personnel du ministère a visité chacun des laboratoires et leur a communiqué les méthodes d'analyse des sols reconnues par le Comité ontarien de la recherche et des services en gestion des sols. Le personnel a aussi dressé une liste du matériel d'analyse et des méthodes de contrôle de la qualité et de suivi du laboratoire. Les laboratoires devaient analyser trois exemplaires d'un certain nombre d'échantillons de sol et devaient respecter des normes quant à la précision des résultats.

Pour recevoir l'accréditation, les laboratoires devaient prouver leur compétence dans les analyses suivantes : pH, pH tampon, phosphore, magnésium et potassium. Il leur était possible d'obtenir également l'accréditation facultative pour les indices de zinc et de manganèse.

En 1989, trois laboratoires recevaient l'accréditation. En 1991, une nouvelle campagne d'accréditation avait lieu; les laboratoires devaient cette fois analyser un jeu de cinq échantillons de sols différents, chaque jeu étant sélectionné séparément. En 2005, l'Ontario possédait six laboratoires accrédités pour les analyses de sols.

En 1998, l'Ontario adhéra au programme North American Proficiency Testing Program (NAPT). Même si cette adhésion fait en sorte que les échantillons fournis par le programme proviennent de sols qui ne sont pas représentatifs des sols de l'Ontario, elle facilite quand même le travail de vérification et assure une plus grande uniformité entre les laboratoires. Les échanges d'échantillons se font quatre fois par année, à raison, à chaque échange, de cinq sols que les laboratoires doivent analyser trois fois en l'espace de trois jours. Pour conserver leur accréditation, les laboratoires sont tenus de maintenir un niveau de précision acceptable pour chacune des méthodes d'analyse reconnues.

D'autres laboratoires peuvent être accrédités pourvu qu'ils démontrent une précision acceptable lors de l'analyse des séries d'échantillons ainsi que des échantillons fournis dans le cadre du programme d'échange NAPT.

du temps, mais qui servent aussi de référence en cas de problèmes.

Un programme de vérification externe des échantillons constitue une mesure de contrôle supplémentaire. Il permet d'établir une

comparaison entre laboratoires et de déceler tout problème qui pourrait ne pas avoir été relevé par le programme interne de contrôle de la qualité du laboratoire.

pH du sol

Le pH du sol est la mesure de l'activité des ions hydrogène ou de leur concentration dans la solution de sol. Cette activité influence la biodisponibilité de la plupart des éléments nutritifs et régit ou conditionne la plupart des processus biologiques.

La concentration des ions hydrogène se mesure avec une électrode indicatrice de pH. Au cœur de cette électrode, se trouve une membrane de verre sensible uniquement aux ions hydrogène. Pendant que les ions positifs pénètrent dans l'électrode, un courant est appliqué, puis mesuré avec un appareil qui n'est ni plus ni moins qu'un voltmètre. La lecture de la tension en volts de plusieurs étalons est prise, ce qui permet d'obtenir un graphique. Les lectures de la tension des échantillons sont ensuite comparées au graphique et des valeurs de pH leur sont attribuées.

Il n'existe pas, pour la mesure du pH, de ratio sol-eau idéal qui fasse l'unanimité. Habituellement, le pH du sol se mesure à l'aide d'une eau désionisée pour former une pâte saturée ou un ratio sol-eau de 1:1 ou 1:2. La pâte saturée est la méthode reconnue en Ontario, sur laquelle se fondent d'ailleurs les recommandations de chaulage. Le pH mesuré tend à augmenter avec l'augmentation de la quantité d'eau ajoutée au sol. La différence la plus grande est observée dans les sols ayant un faible pouvoir tampon, c.-à-d. dans les sables grossiers.

Suivant d'autres méthodes, on utilise des solutions de chlorure de calcium pour préparer une pâte ou une boue, ce qui atténue l'interférence provenant de fortes concentrations de sel. Cette méthode tend à donner une lecture de pH inférieure à celle qu'on obtient avec une boue contenant de l'eau pure.

La pâte saturée est préparée en ajoutant tout juste assez d'eau à l'échantillon de sol pour le saturer totalement sans qu'il reste d'eau non absorbée. La préparation d'une bonne pâte saturée est une tâche longue et difficile, qui donne néanmoins une approximation plus juste du pH à l'interface racine-sol que les boues plus diluées. Le ratio sol-eau élevé de la pâte est abrasif pour les électrodes de pH, ce qui entraîne un plus grand taux d'échec lorsque l'analyse se fait de façon automatisée.

pH tampon

Méthode de Shoemaker, McLean et Pratt (SMP)

La mesure du pH du sol sert à déterminer s'il faut chauler le champ. Selon la culture, les sols dont le pH est inférieur à 6,1 ont besoin de chaulage. La détermination du pH tampon (ou pouvoir tampon) permet de calculer la quantité de chaux nécessaire.

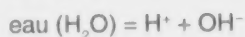
Le pouvoir tampon du sol est le pouvoir de ce sol de résister aux changements de pH. Dans un sol acide, ce pouvoir dépend de l'aci-

Le p minuscule dans pH

En mathématiques, le « p » signifie « logarithme négatif de... »

Dans le cas présent, il s'agit du logarithme négatif de la concentration d'ions hydrogène (H) dans la solution.

L'eau pure renferme certaines molécules qui se sont décomposées en ions individuels, notamment en ions hydrogène (H⁺) ou en ions hydroxyle (OH⁻).



L'eau pure renferme un nombre égal d'ions hydrogène et d'ions hydroxyle, et possède un pH neutre. Si l'on comptait le nombre d'ions H⁺ dans l'eau pure, on trouverait :

1/10 000 000 moles d'ions H⁺
par litre d'eau

En notation scientifique, cela donne 10⁻⁷ ions H⁺; le logarithme négatif de ce nombre est la valeur positive du petit nombre en exposant, soit 7. À mesure qu'augmente la concentration d'ions hydrogène, la valeur du pH diminue et la solution s'acidifie.

Comme l'échelle de pH est logarithmique, un pH de 6 est 10 fois plus acide qu'un pH de 7.

Un pH de 5 est 10 fois plus acide qu'un pH de 6.

dité de réserve. L'acidité de réserve est due à l'hydrogène, à l'aluminium et aux autres cations retenus sur le complexe d'échanges cationiques. Plus l'acidité de réserve est élevée, plus il faut de chaux pour ramener le pH dans une fourchette optimale.

L'acidité de réserve se mesure en ajoutant une solution tampon (SMP) à l'échantillon de sol et en procédant à la lecture du pH du sol et du mélange tampon après une demi-heure. Ce mélange tampon résiste aux changements de pH à partir de 7,5, mais l'acidité du sol réduit le pH du tampon dans une proportion correspondant à l'acidité de réserve du sol. Si le pH de ce mélange tampon est faible, le sol a une forte acidité de réserve et il faudra beaucoup de chaux pour le neutraliser.

Les besoins en chaux se calculent à l'aide des formules fournies dans le tableau 2-3.

TABLEAU 2-3. Calcul des besoins en chaux

pH auquel le sol est chaulé	Équation
7,0	chaux (t/ha)* = 334,5 - 90,79 pH _t ** + 6,19 pH _t ²
6,5	chaux (t/ha) = 291,6 - 80,99 pH _t + 5,64 pH _t ²
6,0	chaux (t/ha) = 255,4 - 73,15 pH _t + 5,26 pH _t ²
5,5	chaux (t/ha) = 37,7 - 5,75 pH _t

* Les besoins en chaux sont calculés en tonnes par hectare, en fonction d'une chaux ayant un indice agricole de 75. (Voir le chapitre 4, p. 97, pour plus de détails.)

** pH_t = pH tampon

Sels solubles

La présence de sels solubles dans les sols peut être le résultat d'applications excessives ou de déversements d'engrais et de fumier, du ruissellement d'eaux chargées de sels épandus sur les routes ou encore de déversements de produits chimiques. On peut aussi retrouver de fortes concentrations de sels dans des zones soumises à des suintements de saumure ou sur d'anciens sites d'exploration pétrolière ou gazière. La présence de fortes concentrations de sels solubles à l'intérieur ou à proximité d'une bande fertilisée peut compromettre sévèrement la croissance des végétaux, sans influencer pour la peine les concentrations salines dans le reste du sol. Les sels solubles nuisent aussi à l'absorption d'eau par les plantes. Pour une teneur en sels donnée dans un sol, la concentration de sels dans l'eau du sol sera d'autant plus grande que le sol renfermera peu d'eau. La croissance des végétaux est surtout compromise par la présence de sels solubles quand les réserves d'eau sont faibles, comme durant les périodes de sécheresse, et dans les sols, comme les sols sableux et graveleux, qui ont une faible capacité de rétention d'eau.

On mesure les concentrations de sels solubles en laboratoire d'après la conductivité électrique d'une boue sol-eau. Plus le sol renferme de sels solubles, plus la conductivité électrique est élevée. Le tableau 2-4, *Interprétation des lectures de conductivité électrique du*

sol, permet d'interpréter les valeurs de conductivité électrique des sols pour des sols cultivés de l'Ontario, en fonction de ratios eau-sol de 2:1. On prépare cette boue en mélangeant du sol séché à l'air avec deux fois son volume d'eau et en utilisant un conductimètre pour mesurer la conductivité électrique de la couche liquide produite.

Pour les sols servant à la serriculture, les analyses de sol reconnues par le MAAARO utilisent un échantillon de sol plus volumineux et effectuent la lecture de la conductivité électrique sur un extrait à saturation. Avec cette méthode, des lectures de conductivité électrique allant jusqu'à 3,5 millisiemens/cm sont acceptables pour les cultures de serre.

Il est difficile de discerner l'excès de salinité dans une bande d'engrais de démarrage parce que le volume de sol touché est faible et que l'excès de salinité peut se dissiper rapidement dans les sols environnants, sous l'effet de la pluie.

Dosage de l'azote des nitrates

La teneur du sol en azote des nitrates au moment des semis peut servir de point de départ pour déterminer les apports d'engrais azoté destinés aux cultures du maïs et de l'orge de printemps. Peu de travaux ont été consacrés en Ontario au dosage de l'azote pour d'autres cultures, comme le blé, le canola ou la plupart des cultures horticoles. Des travaux ont porté sur les cultures de la pomme de terre et de la tomate,

sans toutefois déboucher sur des recommandations précises.

Les laboratoires d'analyse de sol ne font pas systématiquement le dosage de l'azote, car les concentrations de nitrates peuvent varier considérablement d'une semaine à l'autre. Il faut prélever plus profondément les échantillons destinés au dosage de l'azote des nitrates, et il faut les manipuler avec soin pour éviter que les concentrations de nitrates dans le sol ne se modifient.

Il arrive qu'on demande aussi aux labos de doser l'azote ammoniacal, même si ce type d'azote ne fait l'objet d'aucune recommandation. On utilise alors la même méthode d'extraction, mais en soumettant l'extrait à une procédure analytique différente. Si l'échantillon doit servir au dosage de l'azote ammoniacal, il doit être réfrigéré et analysé dans les quatre jours. Si l'échantillon est séché, il ne peut plus servir au dosage de l'azote ammoniacal.

Méthodes

L'azote des nitrates présent dans le sol se trouve presque exclusivement à l'intérieur de la solution de sol. Il est facile à extraire. La méthode reconnue a recours à une solution de chlorure de potassium.

On mélange un échantillon de sol à une solution de chlorure de potassium dans une proportion d'une partie de sol pour cinq parties de solution d'extraction, puis on agite le mélange pendant une demi-heure avant de le filtrer. L'extrait est analysé dans un auto-analyseur, qui

mesure l'intensité de coloration produite après le mélange de l'extrait avec certains produits chimiques.

Remarques

- La méthode reconnue donne des résultats hautement reproductibles et est relativement facile à suivre.
- Les recommandations de fertilisation sont établies en fonction d'échantillons prélevés au moment des semis. Les échantillons prélevés avant l'épandage de fertilisant en bandes latérales dans le maïs (début juin) renferment environ 1,3 fois plus d'azote des nitrates que des échantillons prélevés au moment des semis.
- La variabilité de la teneur du sol en nitrates dans un champ vient compliquer l'interprétation du dosage de l'azote des nitrates.
- La teneur en nitrates du sol risque de sous-estimer la quantité d'azote assimilable dans les sols où d'éventuels apports d'azote de sources organiques sous la forme, par exemple, de fumier d'élevage, de boues d'épuration, de cultures d'engrais vert, n'auraient pas eu le temps de se minéraliser. Des recherches en cours visent à élaborer des analyses de sols qui permettraient de doser l'azote facilement minéralisable dans le sol et la matière organique dont le sol est enrichi.

TABLEAU 2-4. Interprétation des lectures de conductivité électrique du sol

Conductivité électrique (millisiemens/cm)	Salinité	Réaction des végétaux
0-0,25	Faible	Niveau convenable pour la plupart des végétaux si les recommandations de fertilisation sont respectées
0,26-0,45	Moyenne	Niveau toléré par la plupart des végétaux si les recommandations de fertilisation sont respectées
0,46-0,70	Élevée	Niveau pouvant réduire la levée et causer des dommages de légers à graves aux espèces sensibles à la salinité
0,71-1,00	Extrême	Niveau pouvant inhiber la levée et causer des dommages de légers à graves à la plupart des végétaux
> 1,00	Extrême	Niveau pouvant causer des dommages graves à la plupart des végétaux

Phosphore

Dans le dosage du phosphore, la principale différence entre les méthodes tient habituellement au type de traitement que l'on fait subir à l'échantillon pour extraire le phosphore du sol. Les trois méthodes courantes d'extraction du phosphore assimilable sont les méthodes Olsen (bicarbonate de sodium), Bray P1 et Mehlich III. Voir le tableau 2-5, *Agents d'extraction du phosphore*.

Quel que soit l'agent d'extraction utilisé, l'étape suivante consiste à déterminer la concentration de phosphore dans l'extrait. On peut recourir à plusieurs méthodes d'analyse dont certaines sont liées à un agent d'extraction précis. La plus courante comporte l'ajout de molybdène comme réactif de coloration. Cet élément provoque une coloration bleue en combinaison avec le phosphore. Plus la concentration de phosphore est grande, plus la coloration est intense.

L'agent d'extraction utilisé avec la méthode Olsen est très alcalin et tend donc à donner des colorations différentes de celles qu'on obtient avec les méthodes Bray ou Mehlich. De plus, les extraits Bray ou Mehlich tendent à donner des concentrations de phosphore supérieures à celles que donne la méthode Olsen, de sorte que les étalons utilisés dans l'analyse sont différents.

Méthode au bicarbonate de sodium (Olsen)

La méthode recommandée en Ontario est la méthode au bicarbonate de sodium (qu'on appelle aussi méthode Olsen).

Comme la solution d'extraction a un pH de 8,5, elle convient le mieux aux sols ayant un pH entre 6,0 et 8,0. Le bicarbonate de sodium dissout les phosphates de calcium présents dans le sol et certains phosphates organiques. La méthode au bicarbonate de sodium permet de prévoir

la teneur relative en phosphore assimilable d'une vaste gamme de types de sols.

Remarques

- La méthode au bicarbonate de sodium oblige à agiter la solution pendant plus longtemps que les méthodes Mehlich ou Bray (soit pendant 30 minutes au lieu de 5).
- La méthode au bicarbonate de sodium est très sensible à la température, au pH et au temps d'agitation, d'où l'importance de conditions uniformes tout au long de l'analyse pour que les résultats soient cohérents. Olsen a constaté que la concentration de phosphore extractible peut augmenter de près de 0,5 ppm par degré Celsius d'augmentation de la température de la solution d'extraction lorsque celle-ci se trouve entre 20 et 30 °C.

Bray P1

La solution d'extraction Bray contient de l'acide chlorhydrique et du fluorure d'ammonium, qui forment une solution acide. Elle tend à simuler un environnement de sol acide. Cette solution d'extraction convient davantage aux sols acides qu'aux sols alcalins.

La solution d'extraction Bray a tendance à extraire davantage de phosphore que la méthode au bicarbonate de sodium. Toutefois, à des valeurs de pH élevées, l'acidité de la solution d'extraction peut dissoudre les phosphates de calcium et conduire à une surestimation du phosphore biodisponible. Par ailleurs, la présence de chaux libre dans le sol risque de neutraliser l'acidité de la solution d'extraction et de la rendre ainsi moins efficace. Du fait de ces deux situations, la solution d'extraction Bray P1 donne des

TABLEAU 2-5. Agents d'extraction du phosphore

Méthode	Solution d'extraction	pH de la solution	Utilisateurs
Bicarbonate de sodium	solution à 0,5 M NaHCO_3 ; 1 partie de sol pour 20 parties de solution; agitation pendant 30 min	8,5	Ontario, Iowa, la plupart des États de l'Ouest
Bray P1 (Bray faible)	0,025 M HCl + 0,03 M NH_4F ; 1 partie de sol pour 10 parties de solution; agitation pendant 5 min	2,5	Michigan, Ohio, Indiana, Illinois, États de l'Est
Bray P2 (Bray forte)	0,1 M HCl + 0,03 M NH_4F ; 1 partie de sol pour 10 parties de solution; agitation pendant 5 min	2,5	au début des années 1960 en Ontario, avant le bicarbonate de sodium
Mehlich III	0,2 M CH_3COOH + 0,25 M NH_4NO_3 + 0,015 M NH_4F + 0,013 M HNO_3 + 0,001 M EDTA; 1 partie de sol pour 10 parties de solution	2,5	Québec, provinces atlantiques, Pennsylvanie, États du Sud-est

résultats imprévisibles en conditions d'alcalinité.

On a utilisé en Ontario, dans les années 1960, une solution d'extraction Bray P2 modifiée (Bray fort) qui utilisait un acide plus concentré afin de surmonter l'effet neutralisant des sols alcalins. Cette solution d'extraction a été remplacée par le bicarbonate de sodium, qui donnait des résultats plus fiables dans la gamme de sols qu'on trouve en Ontario.

Mehlich III

La solution Mehlich III est une solution d'extraction composée de multiples éléments, dont l'acide acétique, le fluorure d'ammonium, le nitrate d'ammonium et un chélateur, l'acide éthylènediaminetétracétique (EDTA). Elle combine les produits chimiques des solutions d'extraction Bray P1, à l'acétate d'ammonium et au DTPA.

La préparation Mehlich III extrait le phosphore avec l'acide acétique et le fluorure d'ammonium. Elle extrait le potassium, le magnésium, le sodium et le calcium avec le nitrate d'ammonium et l'acide nitrique, et extrait le zinc, le manganèse, le fer et le cuivre avec l'EDTA.

Cette méthode est souvent retenue parce qu'elle accélère l'analyse. Lorsqu'elle est utilisée avec un spectromètre d'émission au plasma inductif capable de doser simultanément différents éléments, cette méthode est intéressante pour les laboratoires. Sans qu'on sache trop pourquoi, le dosage obtenu par émission au plasma inductif peut être différent de celui qu'on obtient

par colorimétrie. Il faut considérer qu'il s'agit de deux analyses distinctes et interpréter les résultats séparément avant de faire des recommandations de fertilisation.

Puisqu'elle est acide, la solution Mehlich III est celle qui convient le mieux aux sols acides, de sorte qu'elle est couramment utilisée au Québec et dans les provinces atlantiques. Le taux d'acidité relativement élevé de cette solution d'extraction signifie qu'elle donne d'assez bons résultats dans des sols légèrement alcalins, même si elle donne des résultats variables dans les sols riches en carbonates (chaux libre).

Potassium, calcium, magnésium, sodium

Le potassium, le calcium, le magnésium et le sodium sont tous chargés positivement (ce sont des cations). Ils peuvent tous être extraits par la même solution, puisque le procédé consiste à noyer le sol avec un autre cation pour les déloger du complexe d'échanges cationiques.

Comme le potassium et le magnésium sont les cations qui limitent le plus souvent la croissance des végétaux, on les mesure systématiquement en Ontario. À part l'azote, le potassium est l'élément qui est le plus prélevé par les végétaux.

Comme les concentrations de calcium sont généralement suffisantes dans les sols où le pH est propice à la croissance des végétaux, les laboratoires ne font pas tous le dosage de cet élément. Les concentrations de calcium sont même souvent tellement grandes qu'elles obligent les

laboratoires à procéder à des dilutions supplémentaires des extraits de manière à ramener les teneurs en calcium dans les fourchettes de fonctionnement du matériel de laboratoire, ce qui rend le dosage plus long et plus laborieux.

Le sodium n'est pas un élément nutritif indispensable aux cultures. Son dosage n'est réalisé que lorsqu'on soupçonne une contamination environnementale.

La présence de chaux libre dans les sols calcaires complique les dosages du calcium et du magnésium. La chaux libre étant en partie dissoute par la solution d'acétate d'ammonium, les résultats d'analyse surestiment les concentrations de calcium et de magnésium dans l'extrait. La quantité de chaux dissoute dépend du pH de la solution d'extraction et du ratio du sol à la solution d'extraction, d'où l'importance pour les laboratoires de suivre à la lettre les procédures d'analyse.

Acétate d'ammonium

L'ammonium provenant de l'acétate d'ammonium est le cation le plus souvent utilisé pour extraire les cations du sol.

La biodisponibilité du potassium est influencée par la température de séchage du sol. À des températures supérieures à 35 °C, le potassium a tendance à se lier aux sites d'échange cationique. C'est la raison pour laquelle les laboratoires laissent sécher les échantillons pendant au moins 2 jours. Un séchage plus rapide pourrait laisser de l'eau dans le sol, ce qui modifierait la concentration finale d'éléments nutritifs,

ou pourrait surchauffer le sol, ce qui fausserait le dosage du potassium.

La mesure des cations présents dans l'acétate d'ammonium est faite après l'extraction.

Mehlich III

L'agent d'extraction Mehlich III peut s'utiliser pour le potassium et d'autres cations, ainsi que pour le phosphore. Les ions d'ammonium provenant du nitrate d'ammonium et du fluorure d'ammonium se comportent de la même façon que l'ammonium provenant de l'acétate d'ammonium, en délogeant les cations des sites d'échanges. Il est ensuite possible de mesurer la concentration de cations dans l'extrait.

La méthode Mehlich III permet d'extraire du sol des quantités de potassium comparables à celles qu'on extrait par la méthode à l'acétate d'ammonium.

Oligo-éléments

Les dosages des oligo-éléments présents dans le sol sont généralement moins fiables que les dosages des macro-éléments nutritifs et que l'évaluation du pH du sol. Cette situation tient aux quantités qui sont extrêmement faibles.

Les concentrations dans les solutions d'extraction peuvent avoisiner les limites de détection des appareils, sans compter le risque de contamination de l'échantillon par les tubes et seaux d'échantillonnage ou la poussière. Il y a aussi les effets du pH du sol, de la matière organique, de la teneur en argile et de la minéralogie à la fois sur les

extractions et sur la biodisponibilité des oligo-éléments. On comprend aisément qu'il soit difficile d'établir un rapprochement entre les dosages d'oligo-éléments fournis par les analyses et la quantité effectivement assimilée par les végétaux.

En Ontario, il existe des analyses de sol reconnues pour les dosages du zinc et du manganèse. Dans le cas des autres oligo-éléments, le lien entre dosage et biodisponibilité n'est pas suffisamment précis pour donner lieu à des recommandations de fertilisation. Privilégier l'analyse tissulaire pour diagnostiquer les carences en cet élément nutritif. Les analyses de sol peuvent toutefois être utiles, comme outil secondaire.

Pour la plupart, les oligo-éléments sont actifs chimiquement et forment normalement des composés insolubles avec un agent d'extraction, ce qui les rend difficiles à mesurer. Les chimistes contournent cette difficulté en utilisant des chélateurs ou des acides faibles pour extraire les oligo-éléments. Les chélateurs sont des composés organiques qui « complexifient » les ions métalliques, se liant à l'ion à plus d'un point et les enrobant. Cette réaction maintient les ions dans la solution, ce qui permet de les séparer du sol pour les mesurer.

Les chélateurs les plus courants sont le DTPA (acide diéthylènetriamine pentacétique) et l'EDTA (acide éthylènediaminetétracétique). Même si les deux ont un comportement analogue, leurs affinités sont légèrement différentes en ce qui a trait à divers ions métalliques.

En faisant varier le pH, on peut utiliser les chélateurs pour extraire certains éléments nutritifs spécifiques. Le DTPA est réglé à un pH de 7,3 pour l'extraction de la plupart des éléments nutritifs du sol. On ajoute de la triéthanolamine à la solution d'extraction comme tampon contre les changements de pH au cours de l'extraction. On lui ajoute également du chlorure de calcium pour empêcher la dissolution du carbonate de calcium dans les sols calcaires.

Zinc

Extraction au DTPA

Pour cette extraction, on mélange le sol avec une solution à 0,005 M de DTPA dans une proportion d'une partie de sol pour deux parties de solution, et on agite le mélange pendant une heure. Le zinc présent dans le sol est complexifié par le DTPA et maintenu dans la solution.

Après extraction et filtrage, on mesure la teneur en zinc de l'extrait.

Remarques

- Le processus d'extraction n'atteint pas l'équilibre, de sorte qu'il faut respecter à la lettre les procédures en ce qui a trait au temps d'agitation, à la vitesse et à la filtration, afin que les analyses soient uniformes.
- Puisque le ratio sol-solution est élevé (1:2), il est difficile de filtrer des échantillons de taille adéquate. La filtration peut prendre plusieurs heures ou même toute une nuit.

Indice de biodisponibilité du zinc

La biodisponibilité du zinc dépend davantage du pH du sol que de la quantité d'éléments nutritifs présents. Les laboratoires d'analyse de sols de l'Ontario expriment les résultats d'analyse pour le zinc en fonction d'un indice de biodisponibilité du zinc plutôt que par un dosage à proprement parler ou en plus de ce dosage.

Voici la formule permettant de calculer l'indice de zinc :

Indice de zinc = $203 + 4,5 (\text{zinc extractible au DTPA en mg/L de sol}) - 50,7 (\text{pH du sol}) + 3,33 (\text{pH du sol})^2$

Interprétation de l'indice

plus de 200	soupçonner la contamination de l'échantillon ou du champ
de 25 à 200	suffisant pour la plupart des grandes cultures
de 15 à 25	suffisant pour la plupart des grandes cultures mais frôlant la carence pour le maïs
moins de 15	probablement insuffisant pour le maïs

- Du fait des longues durées d'agitation et de filtration, l'extraction au DTPA constitue l'un des procédés les plus fastidieux pour le laboratoire.
- Cette analyse est sujette à contamination au cours du processus d'échantillonnage. Dans les champs, veiller à n'utiliser que du matériel de plastique ou d'acier inoxydable. L'usage d'accessoires galvanisés ou de fer contaminera l'échantillon au zinc ou au fer.

Extraction à l'aide de la solution Mehlich III

L'EDTA dans l'agent d'extraction Mehlich se comporte d'une façon très analogue au DTPA. Toutefois, comme la méthode Mehlich est moins utilisée en Ontario, il faut se montrer prudent dans l'interprétation des résultats qu'elle donne.

Manganèse

Extraction à l'acide phosphorique

En Ontario, on utilise comme solution d'extraction une solution faible d'acide phosphorique avec un ratio sol-eau de 1:10. Ailleurs, le DTPA est parfois utilisé comme agent d'extraction, mais la méthode à l'acide phosphorique donne des résultats plus uniformes en Ontario.

Remarques

- L'acide phosphorique permet d'extraire le manganèse du sol beaucoup plus rapidement que l'EDTA.
- Le ratio sol-solution d'extraction est beaucoup plus faible qu'avec la méthode DTPA, de sorte que les échantillons sont filtrés rapidement.

Indice de biodisponibilité du manganèse

La biodisponibilité du manganèse est influencée bien plus par le pH du sol que par la teneur du sol en manganèse. Les laboratoires d'analyse de sols de l'Ontario expriment les résultats d'analyse pour le manganèse en fonction d'un indice de biodisponibilité de cet élément plutôt que par un dosage à proprement parler, ou en plus de ce dosage.

Voici la formule permettant de calculer l'indice de manganèse :

Indice de Mn = $498 + 0,248 (\text{Mn extractible à l'acide phosphorique en mg/L de sol}) - 137 (\text{pH du sol}) + 9,64 (\text{pH du sol})^2$

Interprétation de l'indice

plus de 30	suffisant pour les grandes cultures
de 15 à 30	suffisant pour la plupart des grandes cultures, mais frôlant la carence pour les céréales ou le soya
moins de 15	probablement insuffisant pour les céréales ou le soya

Fer et cuivre

Il n'existe en Ontario aucun test permettant d'établir une corrélation valable entre les concentrations de fer ou de cuivre dans le sol et l'assimilation de ces éléments par les cultures ou la réaction des cultures à un apport de ces éléments. Une carence en cuivre peut être observée dans des terres noires, mais rarement dans des terres minérales. On ne connaît pas de cas confirmé de carence en fer en Ontario.

L'analyse des tissus végétaux est un indicateur beaucoup plus fiable de la biodisponibilité de ces éléments nutritifs.

Bore

Aucun test n'est reconnu en Ontario pour le dosage du bore. Pour se faire une idée approximative de la biodisponibilité de cet élément, on peut l'extraire à l'eau chaude, puis provoquer la floculation du sol à l'aide de chlorure de baryum. La teneur en

bore de la solution d'extraction sera donnée par colorimétrie ou par un spectromètre d'émission au plasma inductif.

Les concentrations de bore étant souvent inférieures à 1 ppm, il est beaucoup plus difficile d'obtenir un résultat précis pour le bore que pour d'autres éléments nutritifs présents dans le sol. De plus, l'ion bore est mobile dans le sol, de sorte que les concentrations fluctuent avec le lessivage et la minéralisation.

L'analyse des tissus végétaux est un indicateur beaucoup plus fiable de la biodisponibilité du bore qu'une analyse de sol.

Soufre

Les laboratoires d'analyse de sol de l'Ontario n'effectuent pas systématiquement le dosage du soufre. Les réserves dans le sol sont peu uniformes du fait du lessivage et de la minéralisation, ce qui rend difficile l'établissement d'un rapprochement entre les dosages du

soufre et les quantités prélevées par les végétaux. Les dosages du soufre sont vraisemblablement plus significatifs quand l'échantillon est prélevé à 30 cm dans le sol plutôt qu'à 15 cm. Quoi qu'il en soit, la quantité de soufre apportée par la pluie et la neige est suffisante pour la plupart des cultures du sud de l'Ontario. Voir la figure 3-12, p. 81. Il n'existe pas de données propres aux conditions de l'Ontario sur les réactions des cultures à différents apports de soufre.

Les laboratoires font l'analyse du soufre sur demande. La technique la plus courante consiste à extraire le soufre du sol à l'aide d'une solution de phosphate de calcium. On mesure la quantité de sulfate dans l'extrait en ajoutant d'abord du baryum qui forme des cristaux de sulfate de baryum, puis en mesurant la turbidité de la suspension obtenue ou en réduisant le sulfate en sulfure et en mesurant celui-ci par colorimétrie. D'autres laboratoires peuvent effectuer le dosage du soufre avec une solution d'extraction Mehlich III et un spectromètre d'émission au plasma inductif.

Matière organique

Bien que la teneur des sols en matière organique n'influence pas les recommandations de fertilisation en Ontario, elle joue quand même un rôle important dans la fertilité des sols.

La matière organique augmente beaucoup la capacité d'échange cationique d'un sol, en améliorant sa capacité à retenir les éléments

nutritifs biodisponibles. Par l'action microbienne, bien des éléments nutritifs réalisent par ailleurs un cycle qui les amène à prendre des formes organique et minérale, de telle sorte que la matière organique est un réservoir d'éléments nutritifs assimilables lentement. Une concentration suffisante de matière organique est indispensable pour que le sol soit meuble et qu'il puisse retenir l'eau. La matière organique est également importante pour l'efficacité de plusieurs herbicides.

La détermination de la teneur du sol en matière organique est d'autant plus importante maintenant qu'il nous faut comprendre les mécanismes de séquestration du carbone qui permettent de lutter contre les gaz à effet de serre. La gestion des sols influence les déplacements nets de carbone vers le sol ou hors du sol, ce qui offre aux agriculteurs des occasions de participer aux programmes d'échange de crédits de carbone. L'évaluation de l'efficacité de ces programmes nécessitera des mesures précises des changements dans la teneur du sol en matière organique.

Il y a deux façons de mesurer les concentrations de matière organique dans le sol. La première consiste à mesurer la quantité de carbone organique dans le sol par la chimie humide ou par l'analyse des gaz de combustion et de multiplier ce poids par un facteur servant à la conversion en matière organique. La seconde méthode consiste à mesurer directement la perte de masse de la matière organique quand le sol est brûlé (perte par calcination).

La détermination de la matière organique par dosage du carbone organique est plus précise que la méthode de la perte par calcination dans les sols pauvres en matière organique, mais elle oblige à utiliser des produits chimiques puissants qui dissoudront les composés organiques, ou des appareils spécialisés.

Les corrélations établies entre les mesures de la matière organique et les dosages du carbone organique sont assez précises, mais la teneur en carbone de la matière organique peut varier en fonction de la source et de l'âge de la matière organique. Par conséquent, les mesures peuvent varier légèrement selon la méthode employée.

En Ontario, la méthode de la perte par calcination est considérée comme étant suffisamment précise pour les sols agricoles. Aux fins de la recherche scientifique toutefois, on privilégie la détermination de la matière organique par dosage du carbone organique, car cette méthode est plus précise. La teneur du sol en matière organique correspond environ à 1,8 ou 2,0 fois la teneur du sol en carbone.

Perte par calcination

La perte par calcination (PPC) permet de mesurer directement la teneur du sol en matière organique. On calcine les échantillons en les plaçant pendant une nuit dans un four à moufle à 425 °C, puis on compare les masses avant et après la calcination. Il faut éviter les températures plus élevées car les carbonates présents dans le sol

se fractionneraient, causant une surestimation de la teneur du sol en matière organique. Le pré-séchage des échantillons à 120 °C réduit la variabilité du test.

Détermination du carbone organique

Méthode Walkley Black modifiée

La méthode Walkley Black repose sur le principe que le bichromate de potassium oxyde le carbone contenu dans le sol. Le bichromate de potassium change de couleur selon la quantité de produits réduits, ce qui permet d'établir un lien entre le changement de couleur et la quantité de carbone organique présent. La lecture se fait à partir de la solution finale à l'aide d'un spectrophotomètre. Les résultats sont ensuite comparés à une table.

Remarques

- La méthode Walkley Black mesure le carbone organique, plutôt que la matière organique. Le facteur de conversion lui-même peut être une source d'erreur. De plus, certains composés organiques ne s'oxydent pas totalement en présence du bichromate, ce qui sous-estime les résultats.
- Cette méthode ne convient pas aux sols qui renferment plus de 7,5 % de matière organique.
- Les réactifs utilisés dans cette analyse sont toxiques et doivent être éliminés en tant que déchets dangereux.

Four à combustion

Ce four brûle l'échantillon à une température supérieure à 900 °C, ce qui permet de mesurer la concentration de dioxyde de carbone dégagée, soit le carbone total. Les résultats sont rapides et précis, mais le matériel employé coûte cher.

Ensuite, on calcine pendant la nuit un autre échantillon dans un four à moufle, afin d'éliminer le carbone organique. Le carbone inorganique (carbonates) présent dans les résidus est mesuré. La concentration de carbone organique correspond à la différence entre le carbone total et le carbone inorganique.

Texture du sol

Évaluation de la texture

Pour la plupart des échantillons, la texture du sol ne fait pas l'objet d'une analyse, mais est plutôt évaluée au toucher. Dans la plupart des rapports, la texture du sol est indiquée par une lettre. Les quatre catégories sont G, grossière pour un sable ou un loam sableux, M ou moyenne pour un loam, F ou fine pour une argile ou un loam argileux, et O ou organique.

Ces catégories ne visent qu'à donner au client un aperçu de la texture. Cette information peut constituer une confirmation que les échantillons proviennent bien des bons champs.

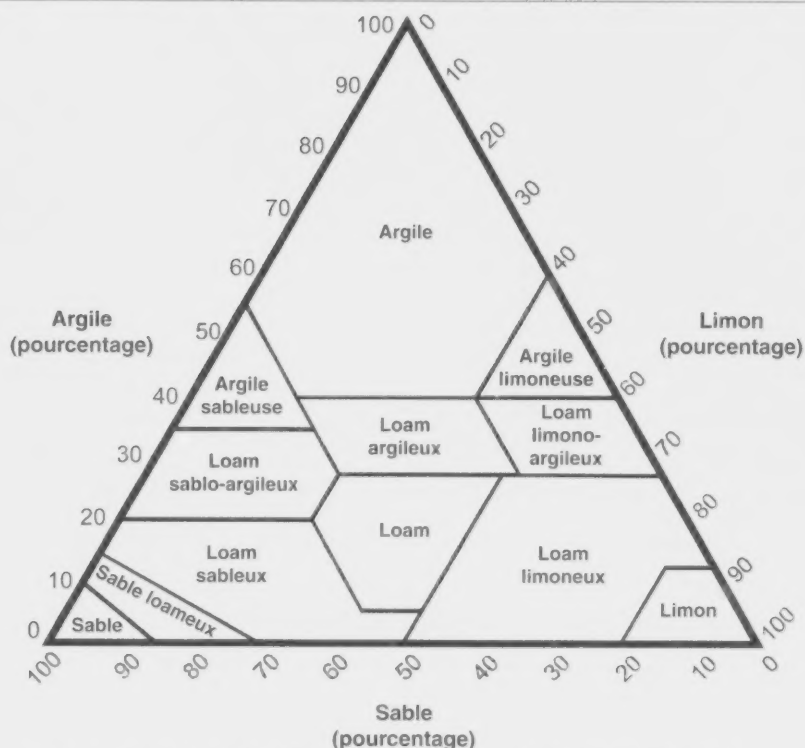
Mesure de la texture

On peut mesurer la texture du sol en faisant se disperser le sol dans une solution détergente, puis en mesurant la quantité de sol qui se dépose avec le temps. Cette méthode repose sur le principe que les grosses particules se déposent plus vite que les petites. Après avoir agité la solution pendant de 30 secondes à 1 minute, tout le sable se sera déposé. De 6 à 24 heures plus tard, tout le limon se sera déposé, laissant l'argile en suspension. Cette technique s'utilise avec une pipette ou un hydromètre qui mesure la concentration de sol en suspension pendant ces périodes.

Le technicien utilise une pipette pour prélever un échantillon de la solution. La solution prélevée avec la pipette est mise à sécher dans un four. Après séchage, on établit la masse du contenu en sol de la pipette. Le technicien peut aussi utiliser un hydromètre spécial pour mesurer la densité de la suspension. Au fur et à mesure que le sol se dépose, la densité diminue et l'hydromètre descend. La méthode de la pipette est plus précise que celle de l'hydromètre, mais plus coûteuse et plus fastidieuse.

Habituellement, la matière organique n'influence pas vraiment la mesure de la texture. On peut déduire la quantité de matière organique à partir de la fraction limon ou argile. On peut aussi, avant de préciser la texture, retirer la matière organique par des moyens chimi-

FIGURE 2-1. Triangle des textures de sol



Ce triangle fait ressortir le lien entre les noms des classes de texture de sol et la distribution granulométrique. Après avoir évalué les teneurs en limon et en argile d'un échantillon, on repère les valeurs correspondantes sur les côtés « limon » et « argile » du triangle. On trace une droite parallèle au côté « argile » qui passe par le point indiqué sur le côté « limon » (correspondant au pourcentage de limon). On trace une seconde droite, parallèle cette fois au côté « sable », qui passe par le point indiqué sur le côté « argile » (correspondant au pourcentage d'argile). Le point de rencontre des deux droites correspond à la classe texturale auquel l'échantillon appartient.

ques. Une fois qu'on connaît les concentrations de sable, de limon et d'argile, il ne reste plus qu'à déterminer la classe de texture de sol en procédant tel qu'il est indiqué à la figure 2-1.

Taille des particules dans les fractions de sols

Sable de 0,05 à 2 mm

Limon de 0,002 à 0,05 mm

Argile < 0,002 mm

Les particules plus grosses que 2 mm (gravier et pierres) ne sont pas prises en compte dans la détermination de la texture du sol.

Nota :

La capacité d'échange cationique est mesurée en unités de charge électrique plutôt qu'en poids, puisque le poids par unité de charge des cations varie considérablement.

La CEC s'exprime en centimole de charge positive par kilogramme (cmol^+/kg). Cette unité de mesure est préférée aux milliéquivalents par 100 grammes de sol, mais les nombres sont les mêmes dans chaque cas. Pour convertir des parties par million en centimoles par kilogramme, on divise les ppm par 10 fois le poids atomique du cation, divisé par sa charge. Par exemple, si le dosage du magnésium (de poids atomique 24 et de charge 2+) révélé par l'analyse de sol est de 480 ppm, la CEC se calculerait comme suit : $(480/(24 \times 10))/2 = 4$ centimoles par kilogramme.

Capacité d'échange cationique et pourcentage de saturation en bases

La capacité d'échange cationique et le pourcentage de saturation en bases ne servent pas à établir les recommandations de fertilisation en Ontario. Lors d'essais où le dosage des fertilisants tenait compte de ces facteurs, la précision des recommandations de fertilisation n'a pas été plus grande et a parfois même été plus faible.

Bien des rapports d'analyse de sol précisent toutefois cette information. Elle est utile du fait qu'elle fournit une indication générale de la fertilité des sols et peut permettre de cerner d'éventuels problèmes cultureux. Le fait de savoir comment l'on obtient cette information peut aider à la replacer en perspective.

Capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique (CEC) donne une idée du potentiel de fertilité du sol en mesurant la capacité totale de ce sol à retenir les cations compris dans les éléments nutritifs. (Pour un exposé complet, se reporter à la p. 49 du chapitre 3).

Les sites d'échanges cationiques constituent la principale source de cations que peuvent assimiler les végétaux. On peut mesurer la CEC directement ou en établir une estimation en additionnant les cations mesurés dans une analyse de sol.

Estimation de la CEC

On estime souvent la capacité d'échange cationique à partir des éléments nutritifs extraits à l'acétate d'ammonium. Cette méthode suppose que seuls les éléments nutritifs qui occupent les sites d'échange cationique sont extraits, ce qui n'est pas toujours le cas. La présence de carbonate de calcium (chaux) dans les sols à pH élevé peut fausser les estimations de la capacité d'échange cationique, parce que l'acétate

Formule d'estimation de la capacité d'échange cationique

valeur de CECb = (valeur Ca \div 200) + (valeur K \div 390) + (valeur Mg \div 120)

(CECb = Capacité d'échange cationique basique)

où chaque valeur de Ca, de K et de Mg (mg/kg de sol) est obtenue par extraction à l'acétate d'ammonium. Cette équation les convertit en centimoles par kilogramme.

On ajoute également un facteur pour la teneur en H⁺ du sol :

si le pH est entre 6,0 et 7,0, la CEC = CECb + 1,2

si le pH est supérieur à 7,0, la CEC = CECb.

si le pH est inférieur à 6,0,

la CEC = CECb + {1,2 \times [70 - (pH_i \times 10)]}.

(pH_i = pH tampon)

Cette formule, élaborée au Michigan, tient compte du pH du sol et de la charge électrique de chaque cation. Elle ne prend pas en compte la présence d'autres cations comme l'aluminium ni la quantité du calcium ou du magnésium dissous provenant des carbonates libres du sol.

Une autre méthode rapide pour obtenir une estimation de la CEC consiste à utiliser le pourcentage d'argile et de matière organique. On multiplie le pourcentage d'argile par 0,5 et le pourcentage de matière organique par 2. La somme des produits obtenus donne une estimation de la capacité d'échange cationique du sol.

d'ammonium dissout également une partie de ce calcium.

Mesure de la CEC

On peut obtenir en laboratoire une indication plus précise de la capacité d'échange cationique en inondant l'échantillon de sol d'un cation marqueur spécifique, ce qui expulse des sites d'échanges tous les autres cations. Ce cation marqueur est par la suite extrait à l'aide d'une solution d'acétate d'ammonium, qui est ensuite analysée pour déterminer la quantité du cation marqueur, laquelle représente la capacité d'échange cationique totale.

Le baryum est un bon ion marqueur parce qu'il n'est pas un élément très répandu dans les sols et qu'il possède une affinité assez forte pour expulser les autres cations des sites d'échanges.

Pourcentage de saturation en bases

On entend par « pourcentage de saturation en bases » le rapport, exprimé en pourcentage, des cations basiques à la capacité d'échange cationique. Voir le tableau 2-6. Le terme est souvent utilisé de manière vague. Il peut se rapporter à chaque cation individuel ou à la somme de tous les cations basiques.

Lorsqu'on calcule ou interprète le pourcentage de saturation en bases, il faut être prudent parce que cette valeur dépend de la façon dont on obtient la CEC. Ainsi, une valeur de saturation en potassium dérivée d'une estimation de la CEC dans un sol calcaire sera trompeuse, en raison des valeurs artificiellement élevées du calcium et du magnésium.

En règle générale, le pourcentage de saturation en bases devrait croître avec l'augmentation du pH et de la fertilité du sol.

Matériel de laboratoire

Auto-analyseur

Cet appareil permet d'automatiser les tâches répétitives de l'analyse chimique. On peut mesurer la concentration de la plupart des éléments d'un extrait de sol ou de plante par réaction avec certains composés chimiques qui donnent une réaction chromogène. L'intensité de la couleur est liée à la concentration de l'élément nutritif.

Dans l'analyseur automatique, on place dans de minuscules tubulures de plastique de petits échantillons d'extraits séparés les uns des autres par des bulles d'air. On introduit dans le tube d'autres produits chimiques en proportions appropriées et on les mélange. Par la suite, le mélange peut être chauffé ou refroidi ou mis en contact avec un catalyseur. Le produit final passe

TABEAU 2-6. Équations des pourcentages de saturation en bases

$$\% \text{ de saturation en Ca} = (\text{ppm Ca} \div 200 \div \text{CEC}) \times 100$$

$$\% \text{ de saturation en K} = (\text{ppm K} \div 390 \div \text{CEC}) \times 100$$

$$\% \text{ de saturation en Mg} = (\text{ppm Mg} \div 120 \div \text{CEC}) \times 100$$

dans une cellule photoélectrique qui mesure l'intensité de la couleur produite. Il faut établir une piste spécifique pour le dosage de chaque élément nutritif, même si, souvent, les analyses peuvent être effectuées en parallèle, ce qui permet de faire subir deux ou plusieurs analyses à un ensemble d'échantillons.

On utilise couramment ces appareils pour le dosage des nitrates, de l'ammonium et du phosphore.

L'analyseur automatique est beaucoup plus rapide que les analyses manuelles, mais il doit être soigneusement calibré à l'aide d'une gamme de solutions de réserve pour qu'une corrélation précise puisse être établie avec les concentrations réelles. Un contrôle constant de la qualité s'impose.

Absorption atomique

Les appareils d'absorption atomique font appel à une flamme qui désintègre l'extrait en ses éléments, puis balaient la flamme d'un faisceau lumineux qui mesure la lumière absorbée par les atomes. Chaque élément absorbe la lumière à une longueur d'onde spécifique, de sorte que la source lumineuse produit un faisceau d'une longueur d'onde spécifique selon l'élément dosé. La concentration de l'élément est proportionnelle à la quantité de lumière

absorbée. La température de la flamme est importante pour garantir que les composés soient désintégrés en atomes.

Puisque les atomes qui composent l'air absorbent également la lumière, on ne peut utiliser cette méthode pour les éléments dont les longueurs d'onde d'absorption se situent dans la même fourchette que celles des éléments présents dans l'air. Cela signifie qu'il n'est pas possible d'utiliser la spectrométrie d'absorption atomique pour doser l'azote, le phosphore, le soufre ou le bore. Cette méthode peut s'utiliser pour plusieurs oligo-éléments (Fe, Mn, Zn, Cu, par exemple) et les éléments des terres alcalines (K, Ca, Mg).

Spectrométrie d'émission

À des températures très élevées et dans des champs électriques puissants, on peut obtenir une excitation des atomes, qui émettent alors de la lumière. Chaque élément émet de la lumière à une fréquence spécifique, que l'on peut mesurer à l'aide d'une cellule photoélectrique. L'intensité de l'émission lumineuse indique la quantité de chaque élément présent.

Le spectromètre d'émission au plasma inductif (ICP) ou le spectromètre à plasma-arc (DCP) permettent de mesurer rapidement la concentration d'éléments dans une solution. On passe un minuscule échantillon d'extrait de sol ou de végétaux à travers la flamme d'une torche produisant des températures élevées et simultanément à travers un fort champ magnétique destiné à exciter les atomes. Quand

les atomes excités reviennent à leur état stable, ils émettent des ondes lumineuses à longueurs d'onde spécifiques. L'intensité de l'émission indique la quantité de chaque élément présent.

Cet instrument donne des mesures précises des éléments totaux présents dans la solution d'extraction pour une fourchette relativement étendue de concentrations, mais il faut le calibrer soigneusement à l'aide de solutions de réserve pour chaque élément.

En Ontario, avec l'extractant au bicarbonate, le spectromètre d'émission au plasma inductif n'est pas utilisé en raison de difficultés mécaniques posées par la solution elle-même.

Matière organique

Manutention et préparation

Tissus végétaux

Les échantillons de tissus végétaux peuvent être expédiés au laboratoire frais, ou séchés à l'air s'ils ne peuvent être envoyés immédiatement. Ne jamais sécher les échantillons au four, puisque les températures élevées peuvent fausser les résultats.

Il est essentiel d'éviter la contamination par le sol, la poussière ou les engrais. Expédier les échantillons dans des sacs de papier, jamais de plastique, pour éviter la condensation et la moisissure.

Au laboratoire, on identifie, inscrit et sèche les échantillons. Les échantillons secs sont moulus, à une granulométrie de 1 mm ou moins et

entreposés dans des contenants hermétiques à l'air jusqu'à l'analyse.

Fumier

Au laboratoire, les échantillons de fumier liquide sont analysés dès la réception. On agite les contenants en les renversant plusieurs fois avant de prélever l'échantillon.

Une partie de l'échantillon de fumier solide est réservée en vue du dosage de l'azote. Le reste est séché au four à 100 °C (212 °F) pendant la nuit, puis moulu pour être ensuite passé au tamis de 1 mm et entreposé dans un contenant hermétique à l'air jusqu'à l'analyse. La teneur en eau du fumier est déterminée en cours de séchage.

Azote

Méthode par combustion

Cette méthode permet de préciser la concentration d'azote total (azote ammoniacal, azote protéique et azote des nitrates) dans la matière organique. On fait calciner les échantillons dans un four et on recueille les gaz. On enlève l'oxygène, le dioxyde de carbone et l'eau, puis on détermine la teneur en azote gazeux par conductivité thermique.

En règle générale, le titrage de l'azote par combustion donne des valeurs légèrement supérieures à celles qu'on obtient par la méthode Kjeldahl traditionnelle, parce que cette dernière ne tient compte que de l'azote protéique et de l'azote ammoniacal.

Remarques

- Il est indispensable que la grosseur et la finesse des particules soient uniformes. On recommande une granulométrie de 1 mm de diamètre ou moins.
- Il est également indispensable de calibrer et d'entretenir fréquemment les réactifs dans l'instrument.

Méthode Kjeldahl

Il s'agit de la méthode habituelle de dosage de l'azote, mais on n'y a pas recours souvent parce qu'elle exige du temps et fait appel à des produits toxiques. Cette méthode consiste à obtenir la digestion de l'échantillon par des acides concentrés sous l'action de catalyseurs qui convertissent l'azote organique en ammonium, puis à mesurer la quantité d'ammonium dans le digestat.

Azote ammoniacal

On peut mesurer la quantité d'azote ammoniacal dans le fumier liquide à l'aide d'une électrode sensible à l'ammonium. Que la matière organique soit solide ou liquide, l'azote ammoniacal peut être mesuré par distillation à la vapeur ou par extraction de l'ammonium à l'aide d'une solution de KCl suivie du dosage de l'azote ammoniacal dans l'extraît. Comme il risque d'y avoir des pertes d'azote ammoniacal pendant le séchage, il est important de travailler avec un échantillon frais ou d'acidifier l'échantillon avant son séchage de manière à éviter les pertes.

On peut déterminer avec plus de précision les concentrations d'azote biodisponible dans le fumier ou les biosolides si l'on connaît les concentrations d'azote ammoniacal et d'azote organique plutôt qu'uniquement la concentration d'azote total. La concentration d'azote organique est présumée correspondre à la différence entre la concentration d'azote total et celle d'azote ammoniacal.

Calcium, phosphore, potassium, magnésium, manganèse, cuivre, fer, bore

On détermine la concentration de ces éléments après oxydation (calcination) des tissus végétaux et dissolution des cendres dans l'acide. Les échantillons sont brûlés pendant deux heures à 550 °C. Les digestats acides sont ensuite analysés pour en déterminer la teneur en éléments nutritifs. Certains éléments, par exemple le phosphore, le potassium, le bore et le cuivre, tendent à se volatiliser à des températures élevées. Il faut veiller à éviter les trop longues périodes de calcination à plus de 500 °C.

Métaux réglementés dans les biosolides

La réglementation actuelle limite les concentrations de onze métaux qui peuvent se retrouver dans des matières de source non agricole destinées à être épandues sur des terres. Ce sont l'arsenic, le cadmium, le cobalt, le chrome, le cuivre, le mercure, le molybdène, le nickel, le plomb, le sélénium et le zinc. Le dosage de ces métaux se fait par dissolution de la matière organique dans un acide puissant, puis par l'analyse des concentrations des éléments dans le digestat. Dans le cas du mercure, pour éviter qu'il ne se dégage de vapeurs toxiques, la procédure employée est légèrement différente.

Sept des métaux réglementés sont des éléments nutritifs indispensables à la vie animale ou végétale. Si les concentrations ainsi obtenues constituent des indicateurs utiles des risques d'accumulation de ces éléments à des niveaux dangereux dans les sols, elles renseignent peu par contre sur la biodisponibilité de ces éléments nutritifs pour les végétaux.

Bibliographie

Information générale

- Black, Charles A. 1993. *Soil Fertility Evaluation and Control*. Lewis Publishers.
- Havlin, J. L., J. D. Beaton, S. L. Tisdale et W. L. Nelson, 2005. *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. 7th ed. Pearson Education Inc., Upper Saddle River, New Jersey 07458.

Pour plus de détails

- Brown, J. R., ed. 1987. *Soil Testing: Sampling, Correlation, Calibration, and Interpretation*. Publication spéciale de la SSSA numéro 21.
- Carter, Martin L., ed. 1993. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science.
- Kalra, Y. P. et D. G. Maynard, 1991. *Methods Manual for Forest Soil and Plant Analysis*. Forestry Canada, Northwest Region, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta. Information Report NOR-X-319.
- Miller, Robert O. et Janice Kotuby-Amacher. 1996. *Western States Laboratory Proficiency Testing Program Soil and Plant Analytical Methods, Version 3.00*. Utah State University.
- North Central Region – 13. 1988. *Recommended Chemical Soil Test Procedures for the North Central Region*. North Dakota State University Bulletin #499.
- Northeast Coordinating Committee on Soil Testing. 1995. *Recommended Soil Testing Procedures for the Northeastern United States*. 2nd ed. University of Delaware Bulletin #493.
- Page, A. L. ed. 1982. *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy.



3 ÉLÉMENTS NUTRITIFS

Comme les cultures prélèvent des éléments nutritifs des sols, les apports d'éléments nutritifs sous une forme ou une autre sont indispensables à une agriculture durable. Ces apports viennent remplacer les éléments nutritifs prélevés par les cultures, stimuler les rendements, améliorer la fertilité des sols et accroître la qualité et l'utilité des cultures.

Les marchés relatifs à certaines cultures exigent qualité, uniformité et maintien de caractéristiques précises. Le secteur des cultures ne cesse d'évoluer, désireux d'offrir aux consommateurs des aliments variés, nutritifs et présentant des avantages pour la santé. Il est de toute première importance de comprendre le rôle que les éléments nutritifs jouent dans l'atteinte de ces objectifs.

Les éléments nutritifs se présentent sous différentes formes dans le sol, parviennent aux racines par différents moyens et jouent des rôles précis dans la biologie végétale.

Formes des éléments nutritifs

Les éléments nutritifs sont retenus de différentes façons dans la matrice du sol. Ils peuvent être :

- dissous dans la solution de sol;
- maintenus à la surface du sol;
- fixés à la matière organique ou contenus dans celle-ci;

- retenus comme composés insolubles;
- fixés dans les argiles.

Dissous dans la solution de sol

Bien des éléments nutritifs ne sont présents qu'en infime quantité à la fois dans la solution de sol. Le prélèvement des éléments nutritifs par interception directe ne peut avoir lieu que par l'intermédiaire d'une pellicule d'eau.

L'importance de ces éléments nutritifs dissous est de loin supérieure à leur quantité. Seule une faible fraction des éléments nutritifs totaux du sol est présente dans la solution, quel que soit le moment. Pour la plupart, les éléments nutritifs demeurent dans le sol sous d'autres formes plus ou moins biodisponibles. À mesure que les éléments nutritifs sont prélevés de la solution de sol et assimilés par les végétaux, ils sont remplacés par des éléments nutritifs présents sous d'autres formes.

Maintenus à la surface du sol

La plupart des éléments nutritifs sont présents dans la solution de sol sous forme d'ions chargés soit négativement, soit positivement. Un ion chargé négativement est un anion et un ion chargé positivement, un cation. Les particules de sol, surtout les particules d'argile, comportent

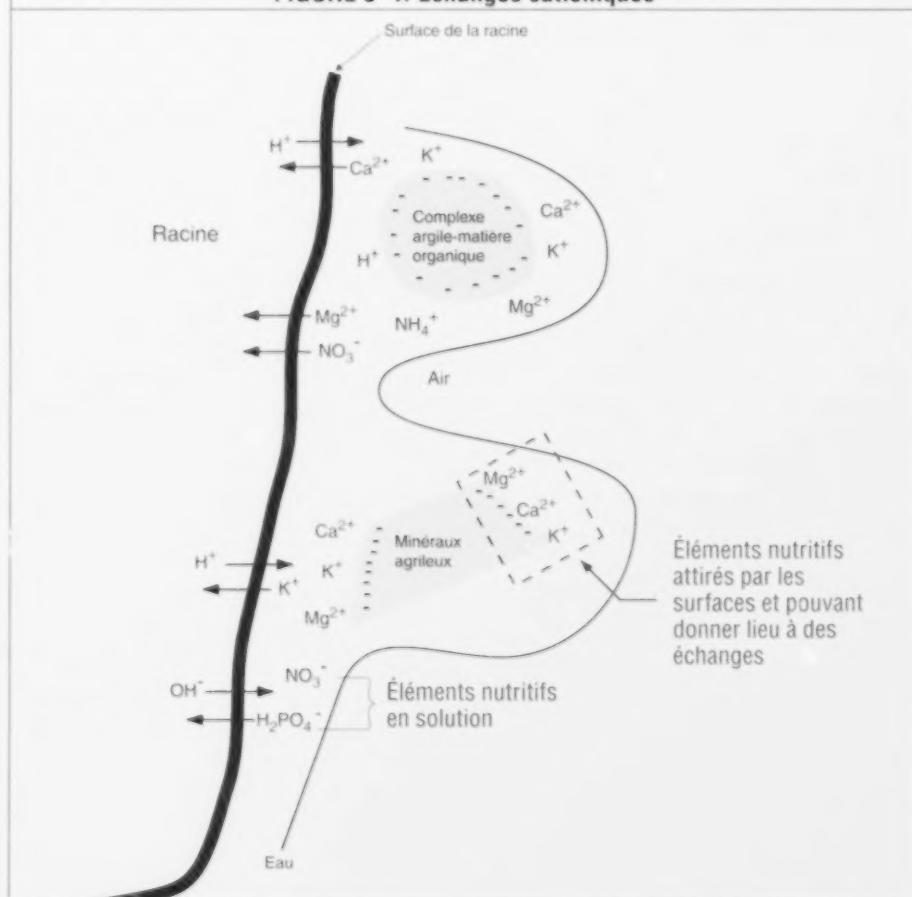
TABLEAU 3-1. CEC type des minéraux argileux

Minéral argileux	Capacité d'échange cationique (cmol/kg)
Smectite (y compris montmorillonite et vermiculite)	10-150
Illite	15-40
Kaolinite	3-15

elles aussi une charge électrique. Puisque les charges contraires s'attirent, les particules de sol attirent les éléments nutritifs et les retiennent dans le sol.

La charge dominante des particules de sol est de très loin négative. Cela signifie que la plupart des ions retenus dans le sol de cette façon sont des cations, chargés positivement. Le nombre de cations qui

FIGURE 3-1. Échanges cationiques



peuvent être retenus est équivalent à l'intensité de la charge négative, qu'on désigne capacité d'échange cationique (CEC).

La CEC rend compte de la capacité du sol à retenir les éléments nutritifs de charge positive. Elle s'exprime en centimoles par kilogramme (cmol/kg). Ces unités ont remplacé les milliéquivalents par 100 grammes, mais les valeurs numériques demeurent les mêmes, c.-à-d. 15 centimoles par kilogramme = 15 milliéquivalents par 100 grammes.

L'importance de la CEC dépend de la texture du sol, des types de minéraux présents et de la quantité de matière organique. Plus la texture devient fine, plus la surface de contact augmente pour chaque gramme de sol, d'où un plus grand nombre de sites chargés négativement et d'où l'accroissement de la CEC.

Les types de minéraux dans la fraction argileuse du sol sont différents de ceux des fractions plus grossières. Au lieu d'être arrondis ou angulaires, les minéraux argileux forment des plaques planes à charges négatives concentrées sur les arêtes rompues des plaques. L'intensité de la charge négative varie selon le type de minéral argileux. Voir le tableau 3-1.

Les minéraux argileux de l'Ontario et des régions environnantes sont constitués surtout d'illites et de smectites. Les kaolinites prédominent dans les sols fortement abîmés par les intempéries des États du sud, mais ne sont pas répandues en Ontario.

La charge de la matière organique est elle aussi à prédominance négative.

Cations

Les cations présents dans la solution de sol et adsorbés sur la surface des particules de sol proviennent de la météorisation des minéraux du sol, de la dégradation de la matière organique et des apports de minéraux et de fertilisants organiques.

Les cations, à charge positive, sont des éléments comme le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), l'hydrogène (H^+) et le potassium (K^+). Les cations retenus sur la matière organique et à la surface des particules argileuses agissent en tant que réserve d'éléments nutritifs, réapprovisionnant sans cesse la solution de sol.

Échanges cationiques

Trop souvent, la capacité d'échange cationique est présentée comme une donnée statique. En fait, elle représente un équilibre actif entre les ions en solution, sur les surfaces du sol et sous d'autres formes dans le sol.

Les cations sont attirés par la surface des particules argileuses. La force d'attraction et la concentration des cations sont maximales à proximité de la surface des argiles, puis diminuent à mesure qu'on s'en éloigne. Les cations se déplacent constamment dans un sens et dans l'autre entre la solution et la surface des particules de sol, mais leur déplacement moyen est en équilibre. Le système est en équilibre.

Si quelque chose vient modifier le système, l'équilibre des déplacements changera. Lorsque les cultures prélèvent des éléments nutritifs et les extraient ainsi de la solution de sol, il se produit un déplacement net hors de la surface des particules de sol qui rétablit l'équilibre entre la solution et le sol.

Absorber : intégrer ou rendre partie de soi-même.

Adsorber : faire en sorte qu'un gaz, un liquide ou une substance dissoute adhère en une mince couche à la surface d'un solide.

Fixés à la matière organique

La matière organique présente dans le sol se compose de résidus de culture, de microbes, d'humus et de matériaux organiques parvenus à divers stades de décomposition. Les éléments nutritifs assimilables par les végétaux sont retenus à l'intérieur de cette matière organique et adsorbés sur les surfaces.

En plus de son rôle dans le cycle des éléments nutritifs, la matière organique joue un rôle important dans la capacité de rétention d'eau du sol et dans le maintien de sa structure. La matière organique se présente sous forme de particules distinctes, mais le plus souvent, elle se présente sous forme d'agrégats, c.-à-d. qu'elle est intimement liée à des particules d'argile et à d'autres particules de sol. La matière organique décomposée par les microbes

du sol constitue le ciment qui retient les agrégats du sol ensemble.

Les éléments nutritifs provenant des résidus de culture et des fumiers sont libérés sous forme minérale dans la solution de sol une fois qu'ils sont décomposés par les organismes terricoles. Ces mêmes organismes peuvent prélever les éléments nutritifs de la solution de sol s'ils en ont besoin pour leur croissance et leur développement. L'azote est d'ailleurs souvent prélevé par eux après un apport de matière organique riche en carbone. Les microbes ont amplement de quoi se nourrir, mais ont besoin d'azote pour leurs protéines et acides aminés, de sorte qu'ils absorbent l'azote du sol qui reste non assimilable, à l'intérieur de leur organisme, jusqu'à ce qu'une partie des composés carbonés soit digérée. Voir Sources organiques d'éléments nutritifs, p. 115.

Étant donné que l'action microbienne intervient dans la libération des éléments nutritifs provenant de la matière organique, elle subit l'influence des conditions météorologiques. Si le temps est trop froid, trop pluvieux ou trop sec, la libération des éléments nutritifs peut être retardée, ce qui risque de nuire aux cultures. Si le printemps est plus froid que la normale, il n'est pas inhabituel d'observer des symptômes de carence en azote dans des cultures de maïs ou de céréales après une sole de légumineuses ou un apport de fumier.

La décomposition de la matière organique joue un rôle important

TABLEAU 3-2. CEC type des sols et de la matière organique

Matériau	CEC (en centimoles par kilogramme)
Sol sableux	2-10
Sol loameux	7-25
Sol argileux	20-40
Matière organique (humus)	200-400
Terre noire > 20 % de m.o.	25-100

dans l'approvisionnement en oligo-éléments.

Les printemps froids et secs peuvent donner lieu à des carences en manganèse. De même, il n'est pas rare d'observer des carences en bore lorsque les sols sont secs.

La capacité d'échange cationique de la matière organique est plus grande que celle de l'argile. Les acides organiques faibles à l'extérieur des particules d'humus sont la source des charges négatives sur la matière organique. Ces sites subissent l'influence du pH. Dans les sols acides, comme l'hydrogène est fortement lié aux particules de sol, ces sites ne peuvent participer aux échanges d'éléments nutritifs. En d'autres mots, la CEC de la matière organique est plus faible dans les sols acides que dans les sols alcalins.

Retenus comme composés insolubles

Plusieurs éléments nutritifs réagissent fortement avec d'autres minéraux du sol, formant des composés insolubles ou légèrement solubles. Le meilleur exemple est le phosphore.

Les phosphates se lient au fer ou à l'aluminium, dans les sols acides,

ou avec le calcium ou le magnésium, dans les sols alcalins, pour former des composés insolubles. Les phosphates réagissent en outre avec les oxydes de fer et d'aluminium du sol et forment des composés qui ne sont que légèrement solubles.

Fixés dans les argiles

Les illites ont entre leurs couches des espaces qui correspondent étroitement à la taille d'un ion potassium. Quand ces sols reçoivent des apports de potassium, les ions peuvent se trouver emprisonnés dans l'argile, une fois qu'ils se sont logés dans ces espaces et que les couches argileuses se sont effondrées sur eux, un peu comme les œufs à l'intérieur d'une boîte d'œufs. L'ammonium a aussi tendance à rester emprisonné comme le potassium.

Les éléments nutritifs ainsi fixés sont peu à peu assimilables par les végétaux. Ils ne sont pas directement échangeables, mais se libèrent graduellement à mesure que les minéraux argileux sont dégradés et dispersés à la suite de conditions extrêmes de sécheresse, de pluie, de gel et de dégel.

FIGURE 3-2. Mouvement des éléments nutritifs dans le sol



Transport des éléments nutritifs vers les racines

Pour que les ions puissent être prélevés par les végétaux, ils doivent se trouver dans la solution de sol et être proches de la surface des racines. Le prélèvement se produit par interception racinaire, par écoulement de masse et par diffusion. Voir la figure 3-2.

Interception racinaire

Les ions nutritifs sont prélevés par contact direct avec la racine ou toute mycorhize qui y est associée. Puisque cette forme de prélèvement

repose sur le contact direct, la quantité d'éléments nutritifs assimilables correspond à la quantité d'éléments nutritifs dans le volume de sol en contact avec les racines. Voir la figure 3-3.

Les racines de la plupart des cultures occupent 1 % ou moins du volume de sol. Toutefois, à mesure qu'elles grossissent, elles choisissent la voie la plus facile à travers les pores du sol et les points faibles entre les mottes de sol. Certains pores, par exemple les trous de vers, sont enrichis d'éléments nutritifs. Les vers enduisent les parois de leurs tunnels de leurs excréments, qui ont une forte teneur en éléments nutritifs assimilables. Par conséquent, les racines peuvent entrer en contact direct avec un maximum de 3 % des éléments nutritifs immobilisés assimilables.

La structure racinaire varie d'une espèce à l'autre. La longueur des racines influe directement sur le volume de sol avec lequel les racines sont en contact. Certaines espèces végétales ont également des poils absorbants ou d'autres structures qui peuvent faciliter l'assimilation des éléments nutritifs.

Comme le montre la figure 3-4, les poils absorbants augmentent le volume de sol dans lequel les végétaux prélèvent les éléments nutritifs. Ainsi, l'oignon n'a virtuellement aucun poil absorbant, tandis que le canola possède des poils absorbants parmi les plus longs. Le canola peut donc avoir accès à un volume de sol de 20 à 30 fois supérieur à celui de l'oignon.

Les prélèvements de phosphore et de potassium sont étroitement liés aux poils absorbants, chez nombre d'espèces végétales. Dans les sols pauvres en phosphore extractible, les poils absorbants peuvent être responsables de 90 % des prélèvements totaux. En raison de leur diamètre plus petit, les poils absorbants prélèvent le phosphore plus efficacement que la racine principale. Ils contribuent ainsi à maintenir des taux de diffusion du phosphore plus élevés.

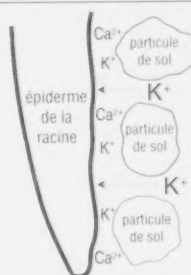
La formation de poils absorbants est influencée par la concentration et la biodisponibilité d'éléments nutritifs comme le phosphore et les nitrates. Dans les sols où le phosphore est facilement assimilable, les structures racinaires se caractérisent en général par des poils absorbants peu nombreux et courts. On observe une augmentation marquée de la densité et de la longueur des poils absorbants dans les sols pauvres en phosphore.

D'autres aspects de la croissance racinaire, notamment les exsudats des racines et les rapports symbiotiques comme celui qui existe avec les mycorhizes (voir l'encadré, p. 56), peuvent augmenter la zone de prélèvement ou le volume de sol se prêtant aux prélèvements d'éléments nutritifs.

Les exsudats racinaires, comme le mucilage qui couvre les surfaces des racines, notamment

leur extrémité, peuvent contribuer à augmenter les prélèvements. Cette substance visqueuse est sécrétée par les cellules de l'extrémité de la racine et par l'épiderme. Elle facilite la lubrification, empêche la racine de se dessécher et facilite le prélèvement d'ions. Le mucilage est particulièrement important dans les sols secs, car il améliore le contact sol-racine et joue un rôle dans le prélèvement du phosphore et des oligo-éléments.

FIGURE 3-3. Interception racinaire



Exige un contact direct.

Puise dans 1 % ou moins du volume de sol.

FIGURE 3-4. Zone des poils absorbants

Xylème Phloème



Pénétration lente de l'eau et des éléments nutritifs vu la perméabilité décroissante

Pénétration rapide

Zone des poils absorbants
• surface d'absorption accrue
• durée de vie des poils absorbants de 2-7 jours

Pénétration lente vu la faible perméabilité
Extrémité de la racine
• division cellulaire active
• faible absorption d'eau

Mycorhizes vésiculaires-arbusculaires (MVA)

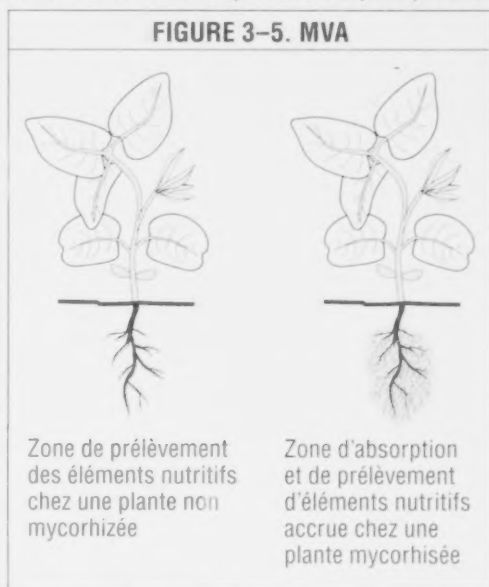
Le terme mycorhize vient du grec *mycos* (champignon) et *rhizae* (racine). Il désigne un rapport symbiotique créé, entre des champignons et les racines de certaines plantes, par les filaments mycéliens (structure comparable aux racines chez le champignon) qui agissent comme une extension du système racinaire de la plante.

Les mycorhizes peuvent augmenter l'interception racinaire des éléments nutritifs en permettant à la plante de prélever ces derniers à même un plus gros volume de sol. D'après certains calculs, l'augmentation pourrait être de dix fois supérieure à celle des racines non mycorhizées.

C'est dans les sols peu fertiles, notamment dans les sols pauvres en phosphore, que l'avantage de cette relation symbiotique est le plus évident. Les plantes mycorhizées y affichent un taux d'absorption du phosphore par unité de longueur racinaire de deux à trois fois supérieur.

À l'exception du canola et d'autres espèces du genre *Brassica*, la plupart des cultures agronomiques possèdent des mycorhizes vésiculaires-arbusculaires. L'efficacité de la mycorhize serait plus grande dans les sols qui ne sont pas travaillés, comme ceux où se pratique le semis direct, ou dans les cultures pérennes à long terme comme les plantations d'arbres. La recherche dans ce domaine se poursuit.

FIGURE 3-5. MVA



Écoulement de masse

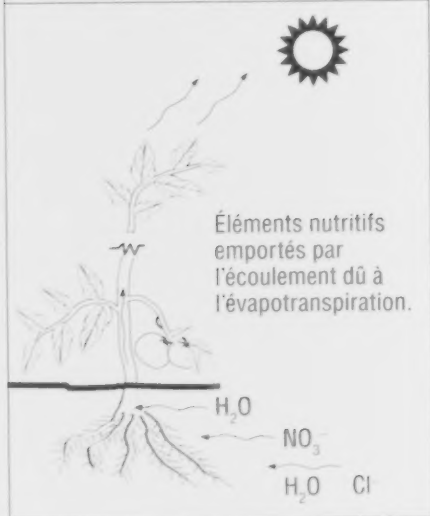
Les végétaux puisent dans le sol de l'eau chargée d'éléments nutritifs et des substances en solution. Voir la figure 3-6. Les pertes d'eau par évaporation et les déplacements d'eau par capillarité constituent aussi des écoulements de masse.

L'utilisation de l'eau par la plante et la concentration d'éléments nutritifs dans l'eau du sol déterminent la quantité d'éléments nutritifs qui

sera prélevée par la plante. Il s'agit du principal mode de transport des éléments nutritifs en solution, tels que nitrates, sulfates, chlorures, bore, calcium et magnésium.

L'écoulement de masse favorise d'autant plus la fertilité des sols que les végétaux sont en croissance active, puisque le taux de transpiration est alors plus grand. Quand les températures sont basses, les éléments nutritifs sont moins mobiles,

FIGURE 3-6. Écoulement de masse



en raison d'une baisse du taux de transpiration, d'un ralentissement de la croissance et d'une réduction de l'évaporation à la surface du sol.

Diffusion

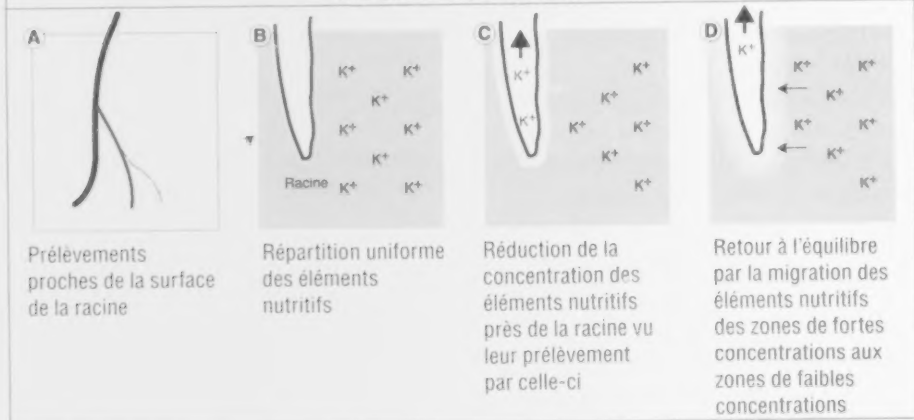
Ce terme s'entend du mouvement des ions des zones où ils sont plus concentrés vers celles où ils le sont moins.

Les racines prélèvent des éléments nutritifs dans la solution de sol environnante, ce qui amène une réduction de la concentration des éléments nutritifs à la surface des racines. Comme la concentration d'éléments nutritifs est plus grande dans la solution de sol, la différence de concentrations provoque la diffusion des ions vers les zones de moindre concentration, comme on le voit à la figure 3-7. La diffusion est influencée par les besoins des végétaux ainsi que par la texture et les teneurs en eau et en éléments nutritifs du sol.

La diffusion est lente dans la plupart des conditions de sol et ne s'opère que sur des distances extrêmement faibles. Il s'agit du principal mode de transport du phosphore et du potassium. D'après les recherches, l'azote parcourrait 1 cm, pendant que le phosphore en parcourrait 0,02 et le potassium, 0,2.

L'aire superficielle du système racinaire détermine le taux de prélèvement des éléments nutritifs attribuable à la diffusion.

FIGURE 3-7. Diffusion



Prélèvement des éléments nutritifs par les plantes

De façon générale, lorsqu'on parle de prélèvement des éléments nutritifs, il est question du prélèvement et du transport des éléments nutritifs par le système racinaire. Même si les végétaux peuvent également prélever des éléments nutritifs par les stomates et la cuticule des feuilles et des fruits, les racines sont la principale voie de prélèvement.

Les plantes prélèvent des ions par des mécanismes actifs et passifs. Les ions se déplacent passivement (sans dépense d'énergie) jusqu'à une barrière à travers laquelle ils sont transportés de façon active (avec un apport d'énergie fourni par la plante) jusqu'aux organes qui métaboliseront l'élément nutritif. Les ions se déplacent à travers les cellules végétales et le liquide interstitiel dans lequel elles baignent.

Les cations (ions positifs) sont échangés le long de la surface à charge négative des cellules racinaires. Les cellules racinaires libèrent des ions positifs d'hydrogène (H^+) qui maintiennent la neutralité électrique. Par conséquent, le pH de la solution de sol décline près des racines des végétaux.

Pour la plupart, les ions nutritifs atteignent les cellules des feuilles par le xylème. Voir la figure 3-8. Toutefois, les éléments nutritifs

peuvent pénétrer dans les feuilles par leurs stomates et leur cuticule et atteindre ainsi le liquide interstitiel à partir duquel ils deviennent assimilables. Les ions contenus dans l'eau de pluie, l'eau d'irrigation ou les applications foliaires de fertilisant peuvent suivre cette voie.

Les ions nutritifs passent des racines aux pousses et autres parties d'une plante grâce à la circulation de l'eau dans la plante. Les taux d'absorption de l'eau et de transpiration sont révélateurs de l'efficacité du déplacement des ions dans la plante. Certains ions nutritifs sont assez mobiles à l'intérieur de la plante et rejoindront les nouvelles pousses, tandis que d'autres ne le pourront pas.

La connaissance de la mobilité des divers éléments nutritifs permet de diagnostiquer les problèmes dans les champs. Les éléments nutritifs mobiles comme l'azote ou le potassium sortent des tissus plus anciens pour rejoindre les nouvelles pousses, ce qui explique que les symptômes de carence s'observent d'abord sur les feuilles anciennes. Dans le cas des éléments nutritifs non mobiles, les symptômes de carence s'observent pour leur part sur les nouvelles pousses. Ainsi, l'endroit où les symptômes apparaissent peut faciliter l'identification des carences.

FIGURE 3-8. Xylème et phloème

Xylème Phloème



Xylème : Tube plutôt creux qui fait monter l'eau et les éléments nutritifs dans la plante.



Phloème : Vaisseau formé de cellules vivantes qui fait monter et descendre de façon sélective l'eau et certains éléments nutritifs et glucides dans la plante.

TABLEAU 3-3. Importance relative des modes de déplacement des ions, du sol aux racines du maïs

Élément nutritif	Quantité nécessaire à 150 boiss. de maïs/ac	Pourcentage fourni par		
		interception racinaire	écoulement de masse	diffusion
azote	170	1	99	0
phosphore	35	3	6	94
potassium	175	2	20	78
calcium	35	171	429	0
magnésium	40	38	250	0
soufre	20	5	95	0
cuivre	0,1	10	400	0
zinc	0,3	33	33	33
bore	0,2	10	350	0
fer	1,9	11	53	37
manganèse	0,3	33	133	0
molybdène	0,01	10	200	0

Cet exemple s'applique à un sol de loam limoneux fertile à pH neutre. Les proportions diffèrent en fonction des conditions du sol.

Source : Stanley A. Barber, *Soil nutrient bioavailability*. (New York: John Wiley & Sons, 1984).

**TABLEAU 3-4. Forme et mobilité des éléments nutritifs
dans le sol et les plantes**

	Mobilité dans le sol	Formes biodisponibles dans le sol	Mobilité dans les plantes
Macro-éléments			
azote	moy.-élevée	ion ammonium NH_4^+ , ion nitrate NO_3^-	élevée
phosphore	faible	ion phosphate H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}	élevée
potassium	faible-moy.	ion potassium K^+	élevée
Éléments nutritifs secondaires			
calcium	faible	ion calcium Ca^{2+}	faible
magnésium	faible	ion magnésium Mg^{2+}	élevée
soufre	moyenne	ion sulfate SO_4^{2-}	faible-moy.
Oligo-éléments			
bore	élevée	acide borique $\text{B}(\text{OH})_3^0$, ion borate H_2BO_3^-	faible-moy.
cuivre	faible	ion cuprique Cu^{2+}	faible
fer	faible	ion ferreux Fe^{2+} , ion ferrique Fe^{3+}	faible
manganèse	faible	ion manganèse Mn^{2+}	faible
molybdène	faible-moy.	ion molybdate MoO_4^{2-}	moy.-élevée
zinc	faible	ion zinc Zn^{2+} , $\text{Zn}(\text{OH})_2^0$	faible
chlore	élevée	ion chlorure Cl^-	élevée

Rôle des éléments nutritifs chez les végétaux

Les tissus végétaux sont essentiellement constitués de carbone, d'hydrogène et d'oxygène, que les plantes tirent de l'eau et du dioxyde de carbone. Les autres éléments nutritifs indispensables sont en général combinés avec ces éléments pour jouer différents rôles liés tantôt à la structure, tantôt au transfert d'énergie, tantôt aux réactions enzymatiques. Pour des raisons pratiques, les éléments nutritifs sont classés en éléments nutritifs primaires, en éléments nutritifs secondaires et en oligo-éléments,

selon les quantités relatives dont les végétaux ont besoin pour croître et se développer.

Les végétaux ont besoin d'éléments nutritifs en quantités suffisantes pour afficher une croissance optimale. Toute carence en l'un ou l'autre des éléments nutritifs indispensables amènera une baisse de rendement ou de qualité. Les besoins des cultures en éléments nutritifs dépendent aussi de facteurs environnementaux qui peuvent nuire à la croissance comme le font les carences. Par exemple, une carence en potassium ou en chlorures peut rendre une culture plus vulnérable à certaines maladies, de sorte qu'on peut s'attendre à une

réaction plus manifeste de la culture à un apport de ces éléments nutritifs lorsque ces maladies sont présentes. Le chapitre 6 traite plus en détail de la détermination des besoins des cultures en éléments nutritifs.

Éléments nutritifs primaires

On appelle éléments nutritifs primaires, ou macro-éléments, les éléments nutritifs dont les végétaux ont besoin en quantité pour simplement croître et se développer. Les six éléments nutritifs qui entrent dans cette catégorie sont le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, le phosphore et le potassium.

Les végétaux tirent le carbone, l'hydrogène et l'oxygène de l'air et de l'eau. Ils doivent puiser dans le sol tous les autres macro-éléments. Les fertilisants, le fumier, la fixation de l'azote ou la météorisation des minéraux réapprovisionnent le sol en éléments nutritifs. Les carences en éléments nutritifs primaires sont celles qui limitent le plus la croissance des végétaux.

N Azote

L'azote présent dans le sol provient au départ de l'azote (N) de l'atmosphère. L'air que nous respirons renferme, en volume, 78 % de N. Cet azote est en grande partie inutilisable par la plupart des végétaux et doit subir une conversion chimique pour passer de sa forme gazeuse (N_2) à une forme biodispo-

nible (azote ammoniacal ou azote des nitrates). Le gros de l'azote est prélevé par les plantes sous forme d'azote des nitrates (NO_3^-), une faible partie seulement étant prélevée sous forme d'azote ammoniacal (NH_4^+). Les différentes transformations que subit l'azote constituent ce qu'on appelle le cycle de l'azote. Celui-ci est illustré à la figure 3-9.

Dans le sol, la plus grande partie de l'azote se trouve dans la matière organique. Le sol peut renfermer des réserves importantes de N organique, qui peuvent représenter des milliers de livres par acre.

Fixation de l'azote

La fixation de l'azote s'entend de tout processus convertissant l'azote gazeux (N_2) de l'air en azote ammoniacal (NH_4^+) ou en azote des nitrates (NO_3^-).

En industrie, on a recours à des procédés à température et pression élevées en présence d'un catalyseur pour combiner l'azote gazeux à l'hydrogène du méthane et obtenir de l'ammoniac. C'est la méthode de base de production de tous les engrais azotés.

Fixation biologique symbiotique et non symbiotique

La fixation symbiotique fait intervenir une plante-hôte et des bactéries infectantes utiles. Parmi ces dernières, les plus courantes et les mieux connues sont les bactéries *B. japonicum* de la famille des Rhizobiacées, qui infectent les racines des plants de soya. Il existe aussi un large éventail d'autres rhizobiums utiles qui infectent les légumineuses telles

que la luzerne et les trèfles. Voir le tableau 3-5. La plante-hôte fournit les glucides aux bactéries colonisatrices qui fixent l'azote atmosphérique dans les nodules qui les abritent et d'où l'azote ainsi fixé est transféré à la plante en vue de la synthèse des protéines. Cette activité est influencée par la concentration de N dans le sol, le pH du sol, le stress imposé à la plante et le climat. La fixation symbiotique est ralentie par une teneur élevée du sol en N résiduel. Quand les plants de soya ont besoin d'azote, ils transmettent un signal biologique aux racines. Celles-ci exsudent une protéine promotrice qui attire les rhizobiums.

Des organismes non symbiotiques, comme les bactéries libres, les *Azotobacter*, les *Azospirillum* et les actinomycètes fixent également l'azote de l'air. La fixation de l'azote peut aussi se faire autrement, notamment par la foudre, qui produit suffisamment de chaleur et d'énergie électrique pour combiner l'azote gazeux à l'oxygène et former de l'azote des nitrates. La quantité d'azote biodisponible produite de cette façon est modeste.

La quantité d'azote reçue sous forme de précipitations serait de l'ordre de 2-15 kg/ha. Au plus, la moitié de cette quantité est fixée par les éclairs.

Minéralisation

Les végétaux ne peuvent assimiler l'azote contenu dans les composés organiques. La minéralisation est la dégradation microbienne de ces composés, laquelle permet la libération de l'azote sous des formes minérales. L'azote est libéré au départ sous forme d'ammonium, qui est converti rapidement en nitrates par une bactérie nitrifiante. La minéralisation et l'immobilisation se produisent en même temps. L'équilibre entre les deux dépend du ratio carbone:azote de la matière organique dans le sol. Le pH du sol aussi joue un rôle important, puisqu'un pH élevé procure un milieu plus favorable à la prolifération bactérienne (6,5 à 7,0). Toutefois, l'élévation du pH amène aussi une forte population de bactéries nitrifiantes, qui ont pour effet d'accélérer de beaucoup la dénitrification.

TABLEAU 3-5. Espèces du genre *Rhizobium* associées à différentes cultures de légumineuses

Espèces du genre <i>Rhizobium</i>	Cultures de légumineuses
<i>Sinorhizobium meliloti</i>	Luzerne, mélilot, fenugrec
<i>R. trifolii</i>	Trèfle (sauf le trèfle Kura)
<i>R. leguminosarum</i>	Pois, vesce, pois de senteur, lentilles
<i>R. phaseoli</i>	Haricots
<i>R. lupine</i>	Lupins
<i>Bradyrhizobium japonicum</i>	Soya
<i>R. loti</i>	Lotier corniculé

Immobilisation

L'immobilisation se produit lorsque NH_4^+ et NO_3^- sont prélevés par les organismes du sol. L'azote devient partie intégrante des organismes du sol et de leurs processus biologiques. Si l'azote devient immobilisé par suite d'un mauvais ratio C:N, l'azote est consommé par les bactéries du sol et n'est plus assimilable par les cultures.

Nitrification

La nitrification est le processus par lequel les micro-organismes du sol convertissent le NH_4^+ en NO_3^- , la forme de l'azote la plus facilement assimilable par les plantes.

Dénitrification

La dénitrification est le processus par lequel le NO_3^- est converti en formes gazeuses d'oxydes de diazote ou d'azote atmosphérique. Elle intervient dans les zones pauvres en oxygène et mal aérées du sol (drainage déficient ou eau stagnante). Les pertes d'azote attribuables aux sols saturés peuvent être évaluées à partir du tableau 3-6, qui indique les risques de pertes en fonction de la température du sol.

TABEAU 3-6. Risques de pertes d'azote des nitrates dans les sols saturés selon la température du sol

Température du sol	Risque de dénitrification (% de NO_3^- -N dans le sol)
< 12 °C	de 1 à 2 % par jour
de 12 à 18 °C	de 2 à 3 % par jour
> 18 °C	de 4 à 5 % par jour

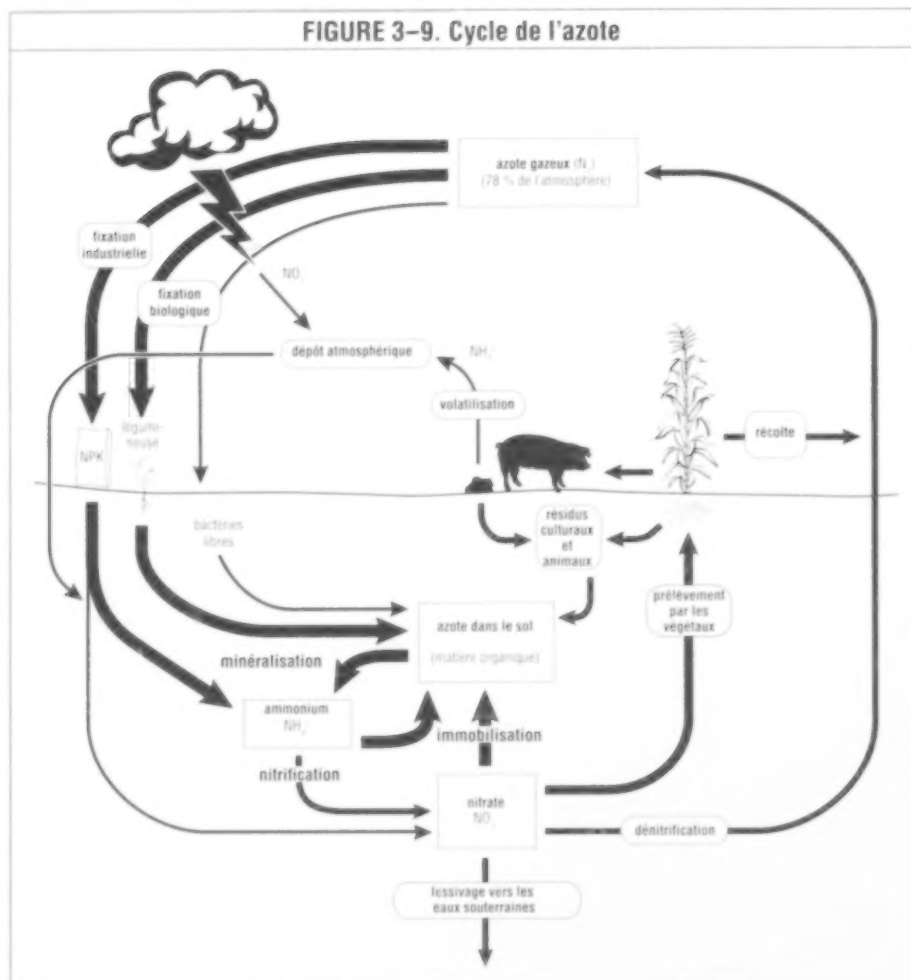
Source : Hoefft, Robert, 2002.

Lessivage

Le lessivage s'entend du mouvement vers le bas de l'azote des nitrates, causé par un excès d'eau. L'importance des pertes d'azote des nitrates et la profondeur de déplacement varient selon la texture de sol, la teneur en eau initiale du sol, la quantité d'eau qui pénètre dans le sol et la durée de l'épisode de pluie. Le lessivage se produit surtout au début du printemps et à l'automne après les récoltes. Ce phénomène est rare pendant les périodes de croissance rapide des cultures.

Une gestion attentive de l'irrigation est nécessaire pour éviter un déplacement excessif d'azote des nitrates. La figure 3-10 montre les écarts dans la profondeur de pénétration de l'eau de pluie ou d'irrigation dans des sols saturés de différentes textures. Ni les nitrates ni les autres solutés ne seront emportés plus profondément par un seul épisode de pluie ou d'irrigation que la profondeur d'infiltration nette (c.-à-d. la profondeur de pénétration de l'eau diminuée de la quantité d'eau s'échappant par ruissellement ou évapotranspiration).

FIGURE 3-9. Cycle de l'azote



Rôle de l'azote

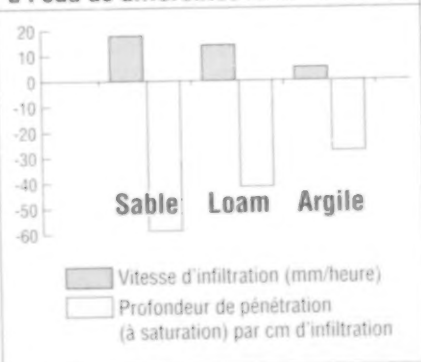
L'azote est présent dans nombre de structures végétales et de processus végétaux. Comparativement à d'autres éléments nutritifs, il est nécessaire en grandes quantités.

L'azote est un constituant principal des acides aminés, qui forment les protéines à l'intérieur de la plante. Les protéines enzymatiques sont importantes dans un certain nombre de processus végétaux,

particulièrement la croissance et le rendement. La teneur en protéines la plus forte se trouve habituellement dans la partie de la plante qu'on récolte, de sorte que c'est souvent un facteur important dans la valeur nutritive d'une culture.

L'azote joue un rôle important dans la production de la chlorophylle, qui donne aux végétaux leur couleur verte. La chlorophylle est responsable de la conversion de la

FIGURE 3-10. Caractéristiques liées à l'eau de différentes textures de sol



lumière du soleil en énergie dont la plante a besoin pour le processus de la photosynthèse pendant le jour.

L'azote ammoniacal a tendance à réduire le pH dans la rhizosphère, ce qui peut accroître la biodisponibilité de certains oligo-éléments, en particulier le manganèse.

Carence en azote

Les carences en azote sont relativement fréquentes dans les terres agricoles de l'Ontario, en raison de la mobilité de cet élément dans le sol. Les causes les plus fréquentes de carence en azote sont le lessivage, une faible nodulation des légumineuses, la dénitrification causée par des sols gorgés d'eau, la sous-fertilisation ou des conditions qui retardent la minéralisation comme des sols secs ou du temps froid.

L'azote est un élément nutritif très mobile à l'intérieur de la plante. À mesure que celle-ci croît et se développe, l'azote peut être déplacé ou réaffecté vers les tissus qui croissent rapidement. Par conséquent, les symptômes apparaîtront d'abord sur les feuilles basses ou plus anciennes.

Ratio carbone:azote

Le rapport entre la teneur en carbone et la teneur en azote de la matière organique détermine s'il y aura minéralisation ou immobilisation. Les bactéries ont besoin d'azote pour décomposer les résidus végétaux ou autres. La décomposition de la matière organique riche en carbone sera lente, à moins qu'elle ne soit facilitée par un apport d'azote. Comme les bactéries du sol consomment elles aussi l'azote biodisponible prévu pour la décomposition de la matière organique, il risque certaines saisons d'y avoir une carence en N tant que le ratio C:N n'est pas favorable.

En règle générale, il y a minéralisation si le ratio C:N est inférieur à 25:1 et immobilisation s'il est supérieur à 25:1.

Symptômes de carence en azote :

- Maïs
 - couleur vert jaunâtre de la plante entière chez les jeunes plants, tiges fileuses;
 - jaunissement en forme de V se formant le long de la nervure médiane des feuilles anciennes en commençant par l'extrémité (voir deuxième page de couverture).
- Légumineuses, y compris soya et luzerne
 - plantes vert pâle, fileuses et rabougries;
 - feuilles qui jaunissent aux stades ultérieurs;
 - carence observée dans la luzerne et le soya, dans

des sols acides, où la nodulation est faible;

- carence plus fréquente dans le soya au début du printemps, lorsque la plante commence à puiser l'azote, non plus dans les réserves de la graine, mais dans les nodosités.
- Céréales
 - plantes vert pâle et finalement jaunissantes;
 - plantes fileuses et rabougries.
(Le blé d'automne souffrant d'une carence en azote peut être vulnérable au piétin ou aux infections par *Septoria*. Quand ces maladies sont présentes, des apports de N supérieurs à la normale peuvent améliorer le rendement).
- Tomate, pomme de terre, poivron
 - chez les jeunes plants, plantes entières vert pâle;
 - chez les vieux plants, les vieilles feuilles jaunissent.
- Fraise
 - plantes pâles, décolorées;
 - croissance réduite.
- Cucurbitacées
 - feuillage pâle, croissance de feuilles rabougries;
 - tiges minces, dures et fibreuses.

Azote et maladies

Un déséquilibre nutritionnel, particulièrement un excès d'azote, peut conduire à une croissance luxuriante donnant à son tour des tissus plus mous et moins résistants aux

maladies. Un excès d'azote peut aussi conduire à des parties foliaires denses qui piègent l'humidité à l'intérieur du feuillage, ce qui crée des conditions propices à l'apparition de nombreuses maladies fongiques.

P

Phosphore

Formes de phosphore dans le sol

Le phosphore se trouve essentiellement sous trois formes dans le sol : le P soluble, le P labile et le P non labile. Moins de 5 % du phosphore total du sol est assimilable ou lentement assimilable par les plantes, peu importe le moment. Le reste peut être retenu dans la matière organique ou dans un certain nombre de complexes minéraux.

P soluble

Le phosphate monohydrogène (HPO_4^{3-}) et le phosphate dihydrogène (H_2PO_4^-) présents dans la solution de sol sont les formes utilisées par les plantes. Le P soluble est préoccupant sur le plan environnemental puisqu'il risque d'être emporté par le ruissellement à la surface du sol ou par les tuyaux de drainage agricole. Même en faible quantité, il peut avoir de lourdes répercussions sur la qualité des eaux de surface. Une bonne gestion passe par une analyse réfléchie des techniques d'application, des taux d'application du P, des concentrations révélées par les analyses de sol et des pratiques de gestion des cultures et des terres.

P labile

Une autre fraction du phosphore est retenue à la surface des particules argileuses. À mesure que le phosphore est prélevé par les végétaux et ainsi extrait de la solution de sol, d'autres ions phosphore sont libérés du sol dans la solution.

P non labile

Dans le sol, le phosphore réagit avec certains ions, tels qu'aluminium, fer et calcium pour former des composés à très faible solubilité. Une partie du phosphore est adsorbée sur l'argile et est virtuellement non assimilable par les plantes.

Puisque les concentrations de phosphore sont relativement faibles dans la solution de sol et que les composés qui résultent des réactions chimiques entre lui et d'autres éléments comme l'aluminium et le fer sont faiblement solubles dans l'eau, la perte de phosphore assimilable par lessivage est modeste.

Renouvellement du phosphore dans la solution de sol

Si la solution de sol renferme une concentration de phosphore de 0,01 ppm et que le sol contient 30 % d'eau en volume, les 50 cm supérieurs de la couche de sol contiennent 0,045 kg de phosphore/ha.

Pour répondre aux besoins d'une culture de maïs de 10 000 kg/ha (160 boiss./acre), la solution de sol doit être reconstituée 667 fois pendant la saison de croissance.

Facteurs influençant la biodisponibilité du phosphore

pH

À des pH élevés, les phosphates réagissent avec les composés calciques et magnésiques, ce qui diminue leur solubilité dans l'eau et leur assimilabilité par les plantes.

Formes primaire et secondaire de phosphate

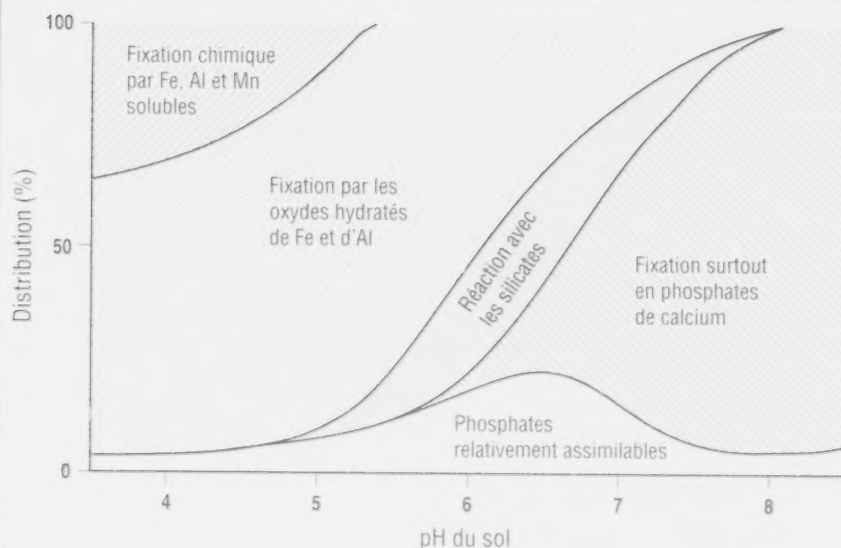
Les plantes prélèvent la plus grande partie de leur phosphore en anions, sous forme d'orthophosphate soit primaire (H_2PO_4^-) soit secondaire (HPO_4^{2-}).

D'après les études, les plantes préfèrent la forme primaire dans un rapport de 10 à 1 environ. Par contre, comme il y a permutation rapide des deux formes dans le sol, cette préférence n'est pas importante.

Le pH du sol influence le ratio. À un pH de 7,2, les plantes prélèvent des quantités à peu près égales des formes primaire et secondaire. Sous ce niveau, elles favorisent la forme primaire.

Il existe d'autres formes de phosphore utilisable, mais en quantités beaucoup moindres que les orthophosphates. Les polyphosphates sont aussi efficaces que les orthophosphates en tant que sources de phosphore pour les cultures. Même si les polyphosphates peuvent dans une certaine mesure être prélevés directement par les plantes, la plus grande partie sera convertie en orthophosphates dans le sol.

FIGURE 3-11. Effet du pH du sol sur les formes de phosphore dans le sol



Fixation inorganique des phosphates ajoutés à diverses valeurs de pH du sol. La proportion de phosphore demeurant assimilable dépend du contact avec le sol, du délai de réaction, des formes organiques et d'autres facteurs.

Source : N.C. Brady, *The nature and properties of soils*, 10th ed. (MacMillan Publishing Company, 1990).

Dans les sols acides, les phosphates réagissent avec le fer et l'aluminium et forment des composés insolubles, ce qui réduit leur assimilabilité par les plantes.

L'assimilabilité du phosphore est maximale à des pH 6,0 à 7,0. Voir la figure 3-11.

Eau et température

Le phosphore se déplace avant tout par diffusion. À mesure que les teneurs en eau du sol diminuent, la pellicule d'eau entourant les particules de sol s'amincit, rendant la diffusion plus difficile.

La décomposition de la matière organique peut devenir une source

de phosphore. L'eau et la température jouent un rôle dans la libération du phosphore de la matière organique par minéralisation. Si la température augmente, le taux de minéralisation s'accroît, ce qui libère davantage de phosphore.

Engrais

Au cours d'une année, les plantes utiliseront jusqu'à 30 % du phosphore épandu sous forme d'engrais ou de fumier. Cela dépend de la teneur de fond du sol en phosphore, de la mise en place des engrais et de la culture pratiquée. Plus on épand de phosphore sous forme d'engrais ou de fumier, plus il y en aura qui

Attention :

Une carence en phosphore dans des cultures vivaces est difficile à corriger. Faire analyser le sol (dans vergers, cultures de petits fruits et vignobles) avant l'établissement de la culture pour vérifier si la quantité de phosphore est suffisante.

sera assimilable par les plantes. Le phosphore inutilisé dans l'année d'épandage reste rémanent.

Moment de la fertilisation et mise en place de l'engrais

Le mouvement du phosphore par diffusion représente à peine quelques millimètres par année. L'épandage en bandes au moment des semis est plus efficace que l'épandage en pleine surface, car il diminue la quantité de phosphore qui vient en contact avec le sol et réduit la fixation du phosphore. L'application du phosphore près du moment des semis réduit le délai entre l'application et l'assimilation par la culture, ce qui réduit la fixation du phosphore.

Le compactage du sol peut limiter sévèrement l'expansion des racines et l'aire superficielle du système racinaire se prêtant au prélèvement des éléments nutritifs. Les engrais de démarrage peuvent contribuer à atténuer les répercussions négatives que le compactage du sol peut avoir sur le prélèvement du phosphore.

Teneur en argile du sol

Plus le sol est argileux, plus le phosphore est adsorbé et moins il est présent en solution et assimilable

par les plantes. Cependant, les sols argileux possèdent une plus grande réserve de phosphore, ce qui permet de réapprovisionner la solution de sol à mesure que l'élément est prélevé par les plantes.

Résidus cultureux

Les sols soumis à des systèmes de travail du sol qui laissent à leur surface de grandes quantités de résidus peuvent réagir davantage aux apports de phosphore dans les engrais de démarrage, car les résidus conservent au sol plus de fraîcheur et d'humidité et les racines sont moins susceptibles d'extraire le phosphore du sol. Les résidus de surface conservent davantage d'eau près de la surface du sol, de sorte que les racines peuvent continuer à prélever le phosphore de la couche arable plus tard dans la saison. Les résidus organiques laissés en surface peuvent retarder les réactions de fixation du phosphore épandu. Par conséquent, si le phosphore est épandu en pleine surface dans un champ soumis au semis direct, il peut être assimilable par les plantes, même si cette méthode n'est peut-être pas souhaitable en présence de risques de ruissellement et de contamination de l'eau.

Rapport entre le phosphore et d'autres éléments nutritifs

Azote

À mesure que la teneur en azote augmente dans la solution de sol, le prélèvement du phosphore augmente. Cet effet pourrait être dû à une baisse du pH, lorsque la solution de sol renferme une plus grande quantité d'ions ammonium. De plus, une plus grande concentration d'azote facilite la diffusion du phosphore des racines vers la tige de la plante.

Zinc

Dans les sols où on retrouve combinées une fertilisation riche en phosphore et des concentrations de zinc faibles ou marginales dans le sol, des symptômes de carence en zinc peuvent se manifester.

Rôle du phosphore chez les végétaux

Comme l'azote, le phosphore est important pour les végétaux, car il intervient dans de nombreux processus métaboliques :

- photosynthèse et respiration;
- stockage et transfert d'énergie (ATP);
- métabolisme des protéines et des glucides;
- division et augmentation cellulaires;
- structure de l'ADN;
- composante des membranes cellulaires.

L'effet de la biodisponibilité et de la réserve de phosphore sur ces processus végétaux se reflète dans certains aspects de la croissance des cultures.

Les racines tendent à proliférer dans les parties du sol les plus riches en phosphore. Globalement, toutefois, si les concentrations de phosphore dans le sol sont élevées, elles réduisent la masse totale des racines. S'il y a limitation phosphorique, la plante s'adapte en réaffectant davantage de ses ressources vers la production de racines et moins vers la croissance de la partie aérienne. Si les réserves de phosphore sont suffisantes, l'augmentation de l'énergie et du métabolisme des glucides offre une meilleure survie hivernale à certaines cultures comme le blé et la luzerne. Le phosphore accélère la maturation de nombreuses cultures, notamment le maïs, les céréales et les tomates. On ne connaît pas parfaitement les raisons de ce phénomène; il pourrait être lié à l'amélioration des transferts énergétiques ou aux rythmes de division cellulaire.

Le phosphore ne se déplace jamais très loin dans le sol. Si les conditions de croissance sont mauvaises (sols froids, secs ou saturés), il peut y avoir un manque en phosphore causée par les conditions météorologiques. Ce type de manque a tendance à être attribuable à une croissance restreinte des racines et non à un sol pauvre en phosphore.

Les grandes cultures, comme celles du maïs et des céréales, prélèvent habituellement de grandes quantités de P au moment où elles n'ont atteint que 20 % de leur croissance. On croit que cette situation serait attribuable à une capacité des plantes de prélever davantage de P qu'il

ne leur en faut pour combler leurs besoins métaboliques, au moment où le P est facilement assimilable et de le garder en réserve dans leurs vacuoles cellulaires. Les plantes utiliseraient ce P en réserve pour combler leurs besoins de P au cours de stades de croissance ultérieurs. Le phosphore agit comme régulateur dans la formation du grain au stade du remplissage du grain. Les besoins en P du grain sont comblés par la diffusion qui s'opère des feuilles vers les tiges.

Carence en phosphore

Des plantes ayant une teinte violacée peuvent souffrir d'une carence en phosphore, bien que ce symptôme ne soit pas fiable. La production d'anthocyanine, qui est à l'origine de cette coloration, est une réaction type à un facteur de stress. De nombreux autres facteurs peuvent provoquer cette coloration.

La carence en phosphore est plus difficile à déceler visuellement qu'une carence en azote ou en potassium.

Symptômes d'une carence en phosphore :

- Maïs
 - plants vert foncé;
 - apparition, parfois, d'une teinte violacée, d'abord sur les feuilles anciennes ou basses (mais cela peut être un caractère normal chez un hybride);
 - progression de la coloration violacée vers le haut du plant, si la carence s'aggrave;
 - premières pousses sou-

vent rabougries et tiges ultérieures parfois filiformes et raccourcies;

- retard de maturité.
- Blé
 - plants vert sombre, à croissance lente;
 - retard de maturité.
- Légumineuses, y compris soya et luzerne
 - retard de croissance, folioles fileuses, réduites, feuilles vert sombre;
 - piètre survie hivernale des légumineuses vivaces comme la luzerne.
- Tomate, poivron, pomme de terre
 - croissance lente, retard de maturité, tissu internervaire violacé sur le revers des feuilles.
- Choux maraîchers
 - feuilles et tiges violacées;
 - rabougrissement, croissance lente.
- Pomme de terre
 - plants rabougris, feuilles vert foncé dont le pourtour s'enroule vers le haut;
 - aggravation possible des symptômes de la brûlure alternarienne et du mildiou sous l'effet d'une carence en P.
- Fraise
 - feuillage vert plus sombre ou bleu-vert.
- Arbres fruitiers
 - diminution de la croissance des tiges, de la floraison et de la nouaison;
 - rarement, feuilles de vert sombre à violacées.



Potassium

Formes de potassium dans le sol

Les minéraux du sol sont riches en potassium, bien que peu de ce dernier soit assimilable par les plantes. Le potassium se présente dans le sol sous diverses formes.

Potassium non assimilable

Dans une proportion de 90 à 98 %, le potassium du sol n'est pas assimilable par les plantes. Il est fixé à des minéraux comme le mica et le feldspath, qui résistent relativement à la météorisation. Toutefois, avec le temps, la météorisation de ces minéraux libère lentement du potassium dans le sol.

Potassium lentement assimilable

Dans une proportion de 1 à 10 %, le potassium total du sol est lentement assimilable par les végétaux. Il est piégé entre les couches de silice et d'alumine des argiles. Ces argiles se contractent et se gonflent au fil des sécheresses et des précipitations. Le potassium piégé entre les couches d'argile est lentement libéré lorsque l'argile se gonfle. À l'opposé, il n'est plus assimilable quand l'argile se contracte sous l'effet de la sécheresse.

Potassium assimilable

Dans une proportion de 1 à 2 %, le potassium du sol est immédiatement assimilable et est retenu dans la solution de sol ou se présente sous une forme échangeable avec la matière organique ou les argiles du sol.

Dans la solution de sol, le potassium conserve un équilibre dynamique. Les ions potassium prélevés par les plantes sont rapidement remplacés par le potassium échangeable. De plus, l'apport d'engrais à base de potassium augmente énormément la teneur en potassium de la solution. L'adsorption du potassium sur l'argile et la matière organique rétablit rapidement l'équilibre.

Facteurs influant sur la biodisponibilité du potassium

Température du sol

Le potassium migre vers les racines des plantes par diffusion. Avec l'augmentation de la température, du taux de diffusion, de la croissance des racines et du taux de conversion du potassium lentement assimilable en potassium assimilable, une plus grande quantité devient assimilable par les plantes.

Systèmes racinaires

Par diffusion, le potassium ne peut migrer que sur de faibles distances. Par conséquent, c'est grâce à un vaste système racinaire que la plante peut atteindre et prélever une plus grande part du potassium assimilable présent dans le sol.

Le développement du système racinaire est propice au prélèvement des éléments nutritifs non mobiles.

Aération du sol

Dans les sols mal aérés (p. ex. sols compactés ou gorgés d'eau), la faible teneur en oxygène nuit au prélèvement du potassium. Cet effet est

plus grave pour le potassium que pour l'azote ou le phosphore.

Teneur en eau (la sécheresse réduit la mobilité et facilite la fixation des éléments nutritifs)

Dans un sol qui renferme peu d'eau, le mouvement du potassium vers les racines se trouve réduit. Le potassium du sol se fixe alors davantage entre les couches d'argile.

Teneurs en argile et en matière organique

Les sols pauvres en argile ou en matière organique offrent moins de sites d'échanges et, par conséquent, retiennent moins le potassium. De fortes pluies sur ces sols peuvent entraîner un lessivage des ions potassium. C'est pour cette raison que des échantillonnages plus fréquents sont parfois nécessaires dans les sols sableux.

Rapport entre le potassium et d'autres éléments nutritifs

Magnésium

De fortes concentrations de potassium peuvent nuire au prélèvement du magnésium par les végétaux, au point, parfois, de provoquer chez ces derniers des carences en magnésium. Des apports importants de potassium dans des sols pauvres en magnésium peuvent donc provoquer des carences en magnésium.

Dans le cas des fourrages, un sol pauvre en magnésium nuira à la nutrition des animaux avant de se répercuter sur la croissance des végétaux.

Rations des vaches taries

Par une gestion plus intensive des cultures fourragères et une utilisation plus efficace des éléments nutritifs compris dans le fumier, les apports de potassium total dans certaines cultures fourragères ont augmenté. Si le sol renferme beaucoup de potassium, les plantes peuvent en prélever plus qu'elles n'en ont besoin pour un rendement maximal.

Des prélèvements excessifs de potassium par la luzerne et les graminées fourragères peuvent aboutir à de fortes concentrations de potassium dans les fourrages servis au bétail, ce qui, chez les vaches taries des races laitières, peut occasionner des problèmes de santé et de nutrition. En effet, dans les trois à quatre semaines qui précèdent le vêlage, un excès de potassium dans le régime peut augmenter l'incidence de la parésie post-partum (ou fièvre vitulaire) et de la rétention du placenta. Les vaches qui reçoivent une alimentation riche en cations voient leur pH sanguin augmenter et en subissent les répercussions sur le métabolisme du calcium. La quantité maximale de potassium souhaitable dans l'alimentation des vaches taries varie. De façon générale, la teneur en potassium des fourrages doit être inférieure à 2,5 % (base matière sèche). L'ajout à la ration de céréales ou de maïs d'ensilage durant les 3-4 semaines qui précèdent le vêlage peut contribuer à répondre aux besoins accrus en énergie et à obtenir une ration affichant un meilleur bilan ionique,

**TABLEAU 3-7. Concentration de potassium dans
certains échantillons de fourrage**

	Moyenne	Élevée	Faible
	% de K	% de K	% de K
Ensilage mi-fané de légumineuses	2,5	4,0	1,1
Ensilage mi-fané mixte	2,5	4,1	0,9
Ensilage mi-fané de graminées	2,3	4,1	0,8
Foin de légumineuses	2,2	3,6	0,6
Foin mixte	2,1	3,0	0,5
Foin de graminées	2,0	3,4	0,4
Maïs d'ensilage	1,0	1,7	0,3
Données tirées d'échantillons soumis à des fins d'analyse auprès d'Agri-Food Laboratories, Guelph, 2000-2005.			

amenant un pH sanguin plus favorable et, du coup, une moins grande incidence de la parésie post-partum.

En général, les vaches en lactation ne souffrent pas autant d'un excès de potassium. Le régime de la vache en lactation est plus riche en énergie, celle-ci étant fournie par des céréales et du maïs d'ensilage, qui ont une plus faible teneur en potassium.

Les concentrations de potassium dans les fourrages varient considérablement. Voir le tableau 3-7. L'analyse du fourrage peut appuyer la gestion de la fertilité des sols et améliorer l'alimentation du bétail. Consulter un spécialiste de l'alimentation du bétail avant de modifier les rations.

Rôle du potassium chez les végétaux

Les plantes ont besoin d'à peu près autant de potassium que d'azote. Le potassium a cette particularité qu'il

reste soluble dans la solution de cellules et ne devient pas partie intégrante des tissus végétaux. Il intervient dans de nombreux processus chez les végétaux. Le potassium :

- favorise la formation de composants structuraux comme la lignine et la cellulose, qui jouent un rôle de premier plan dans la vigueur des tiges et la résistance à la verse;
- influence le prélèvement du dioxyde de carbone, la photosynthèse et la régulation de l'ouverture des stomates de la feuille;
- influence le prélèvement d'eau par les racines;
- influence la teneur en amidon et en glucose (et l'intégrité cellulaire), ce qui améliore les qualités d'entreposage de la pomme de terre, la qualité du jus du raisin, la « pelabilité » et les qualités de transformation des tomates entières;

- favorise la résistance aux maladies et aux insectes;
- réduit la quantité d'azote non protéinique soluble dans les fourrages.

Carence en potassium

Puisque le potassium est mobile dans la plante, les symptômes de carence apparaissent généralement d'abord sur les feuilles plus anciennes, souvent sous forme de nécrose (brunissement) ou de chlorose (jaunissement) du pourtour des feuilles.

Les causes les plus fréquentes de la carence en potassium sont la sous-fertilisation, les rotations comportant de nombreuses cultures de plantes entières, une croissance racinaire restreinte en raison du compactage du sol, les premières étapes du passage à des systèmes de travail réduit du sol dans des sols lourds, ou des conditions de sécheresse dans des sols sableux.

Symptômes d'une carence en potassium :

- Maïs
 - pourtour des vieilles feuilles jaune ou brun;
 - rabougrissement;
 - dessèchement des grains, avortement des grains à l'extrémité des épis;
 - tiges faibles vulnérables à la verse et aux pourritures.
- Luzerne
 - petites taches blanches ou jaunes près des bordures des feuilles (voir deuxième page de couverture);
 - déclin prématuré de la luzerne dans les peu-
- pléments mixtes;
- vulnérabilité accrue à la destruction par l'hiver;
- croissance lente de la repousse.
- Soya, haricots secs, haricot mange-tout
 - jaunissement ou brunissement des pourtours des vieilles feuilles (voir deuxième page de couverture);
 - risques d'enroulement des feuilles vers le bas;
 - réduction de la fixation de l'azote;
 - maturité inégale.
- Céréales
 - jaunissement général;
 - feuilles pouvant jaunir ou bronzer sur leur pourtour;
 - tallage excessif dans certains cas.
- Tomate
 - jaunissement des bordures des feuilles;
 - épaules jaunes sur les fruits mûrs (nuisant à la transformation des fruits entiers).
- Raisin
 - pourtour des feuilles bronze;
 - enroulement des feuilles vers le bas.
- Pomme de terre
 - brûlure des feuilles;
 - baisse de rendement.
- Cucurbitacées
 - feuilles chlorotiques;
 - développement irrégulier du fruit, petit à l'extrémité pédonculaire et gros à l'extrémité apicale.

Éléments nutritifs secondaires

Le calcium, le magnésium et le soufre sont nécessaires en quantités modérées. Ces éléments sont habituellement classés parmi les éléments secondaires parce qu'ils sont moins susceptibles de limiter la croissance des cultures. Ils sont généralement présents dans le sol en quantités suffisantes.

Ca

Calcium

La plupart des sols ontariens recèlent des quantités relativement importantes de calcium, car ils ont été formés à partir de matériaux d'origine calcique. Le calcium dans les solutions de sol est prélevé par les plantes ou pénètre dans le complexe d'échanges du sol et est retenu par les colloïdes argileux et la matière organique à charge négative.

Il existe, comme pour tous les cations, un équilibre entre la phase solution et la phase d'échange. Si le calcium dans la phase solution est prélevé par la culture ou perdu par lessivage, l'ion calcium (Ca^{2+}) sera libéré des sites d'échanges pour restaurer la réserve et rétablir l'équilibre. À l'inverse, si le Ca^{2+} augmente dans la solution, davantage d'ions se fixeront aux sites d'échanges.

L'assimilabilité du calcium par les plantes est fonction de ce qui suit :

- la réserve totale de calcium;

- le pH du sol, les sols à pH faible étant plus sujets aux carences en calcium;
- la CEC, car la capacité du sol à retenir les cations détermine la quantité de calcium qui pourra être libérée et rendue assimilable par les plantes;
- le type de sol, le calcium étant perdu par lessivage dans les sols sableux.

Rapport entre le calcium et d'autres éléments nutritifs

Les prélèvements de calcium sont réduits par l'azote ammoniacal et les excès de potassium, de magnésium, de manganèse et d'aluminium.

L'azote des nitrates est la meilleure source d'azote là où la réserve de calcium est faible ou critique pour la qualité des cultures. Lorsque la plante prélève des nitrates, à charge négative, elle peut plus facilement assimiler les cations, à charge positive, notamment ceux de calcium.

Rôle du calcium chez les végétaux

Le calcium est prélevé par les plantes sous forme d'ions calcium (Ca^{2+}). Il atteint la surface des racines par écoulement de masse et interception. Le calcium est important pour la stabilisation de la paroi cellulaire et intervient dans le métabolisme et la formation du noyau cellulaire. Le pectate de calcium dans les parois cellulaires agit comme une barrière contre la pénétration des maladies. L'augmentation des rendements commercialisables que procure la diminution des désordres physiolo-

Troubles liés au calcium

La pourriture apicale est le résultat d'un manque de calcium dans la tomate. Voir la troisième page de couverture. Souvent, le sol renferme suffisamment de calcium, mais le flux de transpiration transporte le gros du calcium à travers la plante vers les feuilles plutôt que vers le fruit. Le stress hydrique, induit soit par la petitesse des racines, un système racinaire restreint, un excès de fertilisation azotée ou simplement un manque d'eau, rend la plante plus sujette aux déséquilibres calciques.

Selon les essais réalisés, il n'y aurait aucun avantage à faire des apports de calcium, par exemple de nitrate de calcium ou de calcium foliaire sur les tomates. Le problème est la régulation interne du calcium.

La brûlure de la pointe de la laitue, le cœur noir du céleri et de la pomme de terre et la tache amère de la pomme sont d'autres manifestations de carences en calcium. Dans nombre de ces cas, il peut être avantageux de prévoir une application foliaire de calcium.

giques serait attribuable à des concentrations suffisantes de calcium.

Le calcium joue un rôle mineur en tant que catalyseur dans l'activation de quelques enzymes et la détoxification des acides métaboliques.

Le calcium migre par l'écoulement de masse causé par la demande d'eau subséquente à la transpiration des végétaux. Par conséquent, l'essentiel du calcium se déplace vers les grosses feuilles qui demandent beaucoup d'eau, parfois même davantage que les fruits, qui

perdent relativement peu d'eau par évapotranspiration. Il arrive qu'apparaissent des problèmes liés au calcium.

Le calcium se déplace dans le réseau du xylème. Les carences se manifestent à l'extrémité des pousses nouvelles ou terminales.

Carence en calcium

Les carences en calcium sont rares en Ontario. Si le pH du sol se situe dans la fourchette recommandée, les réserves de calcium suffisent à la plupart des cultures. Une étude

Gestion du calcium dans les cultures intensives

Il y a des endroits en Ontario où le sol est sableux, à faible CÉ, à faible pouvoir tampon et à pH apparent neutre, qui sont pauvres en calcium. Ces sols souffrent habituellement du manque d'eau avant que les symptômes de carence en calcium ne se manifestent.

Ces sols conviennent aux cultures qui se prêtent à l'irrigation goutte-à-goutte. Ces modestes concentrations de calcium peuvent devenir problématiques quand les apports d'eau sont importants. Un épandage de gypse, de chaux, de nitrate de calcium ou de chlorure de calcium doit alors être envisagé pour augmenter la teneur du sol en calcium.

révèle que dans les sols affichant des concentrations de calcium inférieures à 350 ppm, les pommes de terres commencent à réagir à des apports de calcium par la formation de tubercules plus gros, sans toutefois que ces apports n'améliorent le rendement total (Ozgen, Palta et Kleinhenz, 2006).

S'il y a carence en calcium, les symptômes sont observables sur les tissus en croissance active, car le calcium est immobile dans la plante une fois qu'il est fixé à la structure de la cellule.

Mg Magnésium

Les niveaux de magnésium varient considérablement sur le territoire ontarien, en fonction du matériau d'origine. Tout comme le calcium, le magnésium est fortement attiré vers les sites d'échange cationique, mais il percole un peu plus facilement que le calcium.

Le magnésium est présent dans le sol en solution ou sous une forme échangeable, de même que sous des formes lentement assimilables comme la chaux dolomitique, les minéraux argileux et le feldspath. Il y a quelques régions, surtout dans l'est de l'Ontario, où les concentrations de magnésium sont plus élevées que les concentrations de calcium. Ces sols sont caractérisés par une mauvaise structure et un mauvais drainage interne. Des épandages de chaux calcitique ou de

gypse peuvent améliorer la productivité de ces sols.

Le magnésium prend contact avec la racine par les trois modes de transport : écoulement de masse, interception racinaire et diffusion.

Rapport entre le magnésium et d'autres éléments nutritifs

La biodisponibilité du magnésium dépend de plusieurs autres éléments nutritifs. Le potassium, s'il est présent à de fortes concentrations et échangeable, peut interférer avec la biodisponibilité du magnésium. L'ammonium peut également interférer avec l'assimilabilité du magnésium par les plantes. Cela se produit le plus souvent lorsqu'on applique de fortes doses de fertilisants à base d'ammonium sur des sols carencés en magnésium.

D'après certaines recherches, le magnésium favoriserait l'assimilation du phosphore et sa mobilité dans les plantes. Les pertes de magnésium dans le sol sont dues aux prélèvements par les cultures, au lessivage et à l'érosion.

Rôle du magnésium dans les plantes

Le magnésium joue plusieurs rôles dans la croissance et le développement des plantes :

- structure des molécules de chlorophylle;
- synthèse des protéines;
- activation des enzymes (rôle indispensable).

Carence en magnésium

Les symptômes d'une carence en magnésium se manifestent souvent dans le bas du feuillage, compte tenu que le magnésium est mobile dans les plantes et qu'il peut migrer vers les nouvelles pousses et y être réutilisé. Selon les espèces, la carence en magnésium se manifeste tantôt par une coloration rouge, tantôt par la nécrose des tissus entre les nervures ou une coloration vert pâle du feuillage par suite d'un manque de chlorophylle.

Comme les carences en calcium, les carences en magnésium sont liées à des problèmes de pH. Les sols acides à texture grossière sont plus susceptibles d'afficher une carence en magnésium. Les sols à texture grossière qui renferment peu de magnésium et qui reçoivent des épandages répétés de fumier peuvent à long terme présenter une carence en magnésium induite par la forte teneur en potassium du fumier, surtout s'il s'agit de fumier de ruminants.

Tétanie d'herbage

La tétnie d'herbage ou hypomagnésiémie de la vache est un déséquilibre du magnésium chez les ruminants, attribuable à la consommation d'aliments pauvres en magnésium. La faible teneur en magnésium des aliments peut être due à l'épandage de fortes doses de fertilisants à base d'ammonium ou de potassium sur la culture. Une forte concentration de protéines dans la ration nuit aussi à l'assimilation du magnésium par l'animal.

Symptômes d'une carence en magnésium :

- Maïs
 - rayures d'abord de jaunes à blanches entre les nervures des vieilles feuilles, les zones rayées finissant par mourir (voir deuxième page de couverture);
 - coloration de rougeâtre à violacée se développant sur les vieilles feuilles;
 - possibilité de confusion avec la carence en zinc, la différence étant que, dans le cas de la carence en magnésium, les rayures sont définies et vont de la base à la pointe de la feuille.
- Soya
 - coloration vert pâle entre les nervures des feuilles inférieures au début de la croissance;
 - bordures de feuilles recourbées vers le bas, feuille entière jaune, sauf à la base;
 - propagation des symptômes aux feuilles du milieu du plant, qui s'apparente à une maturation hâtive.
- Luzerne
 - coloration vert pâle des vieilles feuilles;
 - rabougrissement et manque de vigueur du plant, apparition de taches de rouille formant des zones nécrotiques entre les nervures des feuilles, dépérissement possible du pourtour des feuilles;
 - faible développement des nodosités.

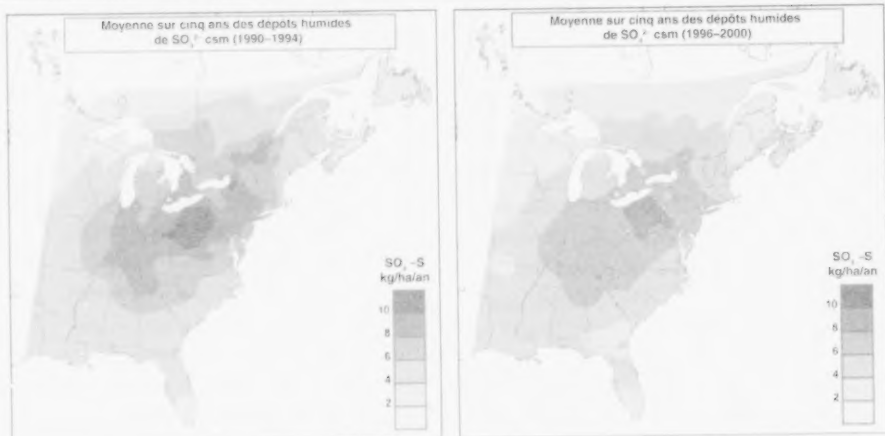
- Céréales
 - manque de vigueur et rabougrissement des plants, retards dans la reproduction;
 - grandes taches irrégulières sur toute la zone située à l'extrémité des feuilles, progressant sur le pourtour des feuilles jusqu'à gagner la base des vieilles feuilles;
 - rayures parfois présentes sur les feuilles qui vont alors du vert pâle au jaune, au rouge et au brun.
- Pomme de terre
 - chlorose avec nervures vertes et taches brunes sur les jeunes feuilles matures (dessèchement des feuilles entre les nervures);
 - malgré de nouvelles feuilles vertes, feuilles qui se dessèchent tout en restant attachées, dans les cas de carences graves.
- Tomate
 - symptômes d'abord visibles sur les vieilles feuilles;
 - veinures vert foncé, zones internervaires jaunies, symptômes intensifiés par un manque d'azote.
- Céleri, carotte
 - nécrose des bordures des feuilles et chlorose internervaire des vieilles feuilles;
 - enroulement des feuilles.
- Raisin
 - nécrose internervaire et du pourtour des feuilles;
 - jaunissement ou rougissement internervaire;
 - développement de taches brun-vert.

S Soufre

La réduction d'émissions atmosphériques de soufre et l'utilisation de produits fertilisants plus raffinés au cours des dernières décennies ont conduit à une baisse des dépôts de soufre dans le bassin des Grands Lacs. Voir la figure 3-12. Le soufre est un élément indispensable à la croissance des végétaux. Dans le passé, on présumait que les concentrations de soufre dans le sol suffisaient à la production culturale en Ontario. En général, les réactions des grandes cultures aux apports de soufre ont été sporadiques et isolées.

La détermination de la situation à l'égard du soufre oblige à faire une analyse de sol, une analyse des tissus, à observer et à tenir compte des besoins spécifiques des cultures. Il n'existe pas actuellement en Ontario d'analyse de sol reconnue pour le dosage du soufre. Toutefois, les laboratoires ontariens offrent de faire le dosage à l'aide d'un test qui est utilisé ailleurs. La difficulté réside dans l'interprétation des résultats d'analyse en vue d'établir des recommandations, faute de données sur l'efficacité des apports dans les conditions de l'Ontario. Il peut être risqué de se fier à des recommandations établies pour d'autres régions. Souvent, l'évaluation des tissus végétaux et une bande d'essai au champ permettent de savoir à quoi s'en tenir quant au soufre dans un système cultural en particulier. Les cultures qui ont un besoin connu de soufre, comme celle du

FIGURE 3-12. Dépôt de soufre atmosphérique



* SO_4^{2-} csm = dépôts de sulfates (SO_4^{2-}) corrigés en fonction du sel de mer

Source : Ro et coll., 2006.

canola, méritent une attention toute spéciale.

Le soufre est présent dans le sol sous de nombreuses formes, à la fois organiques et inorganiques. Les ions sulfate (SO_4^{2-}) sont la forme assimilable par les plantes. La plus grande partie du soufre du sol se trouve dans la matière organique. La transformation du soufre des formes organiques et inorganiques en sulfate assimilable par les plantes comporte quatre étapes principales :

- la minéralisation;
- l'immobilisation;
- l'oxydation;
- la réduction.

La minéralisation est la décomposition de la matière organique dans laquelle le soufre organique est dégradé par les bactéries en sulfate assimilable par les plantes.

L'immobilisation est le processus contraire; les bactéries reconvertis-

sent les sulfates en soufre organique non assimilable.

La température, le pH et la teneur en eau du sol, autant de facteurs qui influencent la prolifération microbienne, ont une incidence sur la minéralisation de la matière organique et par conséquent sur la vitesse à laquelle le soufre est transformé en sulfate biodisponible, et sur la quantité de sulfate produit.

L'oxydation est la réaction entre le soufre et l'oxygène qui donne la formation des sulfates. C'est un processus important, puisque certains engrais sont des formes réduites du soufre et que cette conversion les rend assimilables par les plantes.

La réduction est le processus inverse; Les sulfates sont débarrassés de leur oxygène en milieu anaérobie. Les sols mal drainés peuvent donner lieu à cette réaction, qui peut générer des composés sulfurés

lorsque les sols restent gorgés d'eau pendant des périodes prolongées.

Facteurs influençant les besoins en soufre

Ratios carbone:soufre

Le soufre subit bon nombre des mêmes réactions de minéralisation et d'immobilisation que l'azote dans le sol. L'ajout de résidus affichant un ratio C:S élevé (> 200:1) peut provoquer l'immobilisation du soufre et des carences temporaires en cet élément. Cette situation se produit plus souvent avec les résidus de cultures à maturité comme la paille qu'avec des résidus encore verts comme le trèfle ou des engrais verts.

Ratios azote:soufre

Le ratio N:S dans les tissus végétaux s'étend de 7:1 à 15:1, selon l'espèce et le stade de croissance. Les cultures qui reçoivent des apports importants d'azote alors que la réserve de soufre dans le sol est faible risquent d'afficher une carence induite en soufre. Ce risque a conduit, dans l'Ouest canadien, à une pratique répandue qui consiste à épandre, pour chaque tranche de 3-4 kg d'azote, 0,5 kg de sulfate de soufre sur les cultures de canola. Il se peut que les producteurs de l'Ontario soient contraints d'adopter la même pratique pour leurs cultures intensives de canola, surtout si le dépôt atmosphérique de soufre continue à diminuer.

Rôle du soufre chez les végétaux

Le soufre est un constituant de 2 des 21 acides aminés qui forment les protéines. De plus :

- il facilite le développement des enzymes et des vitamines;
- il participe à la fixation de l'azote dans les légumineuses;
- il facilite la production des semences;
- il est nécessaire à la formation de la chlorophylle.

Le soufre donne son goût piquant au raifort et leurs couleur, saveur et odeur caractéristiques à des plantes comme l'ail, l'oignon et le chou.

Carence en soufre

Les symptômes de carence en soufre sont analogues à ceux de la carence en azote, sauf que la plante entière demeure vert pâle, le soufre n'étant pas mobile dans la plante.

Symptômes d'une carence en soufre :

- Maïs
 - chez les petites plantes, jaunissement général du feuillage, rabougrissement, maturité retardée.
- Légumineuses incluant soya et luzerne
 - feuilles petites, vert jaunâtre dans le haut de la plante;
 - tiges minces, érigées, ligneuses et allongées.
- Céréales
 - jaunissement interne-vaire des feuilles jeunes;
 - talles redressées.
- Pomme de terre
 - plante entière vert pâle;
 - en cas de carence sévère,

enroulement des folioles vers le haut.

- Canola
 - nouvelles feuilles vert jaunâtre aux nervures sombres s'enroulant vers le bas;
 - feuilles violacées s'enroulant vers le bas, cosses peu nombreuses, petites et parfois vides;
 - carence pouvant se manifester à tout stade de croissance;
 - si la carence est faible, bonne croissance végétative mais fleurs pâles et cosses sous-développées;
 - repousse du chaume après la récolte;
 - symptômes de carence pouvant apparaître à la suite de pourritures des racines.

Pluies acides et soufre

Bien des gens savent que la pluie et les neiges acides apportent à la plupart de nos sols tout le soufre dont ils ont besoin. Ces précipitations ajoutent chaque année 8–13 kg/ha de $\text{SO}_4\text{-S}$ aux sols dans la plus grande partie des zones agricoles du sud de l'Ontario. Le nord-ouest ontarien reçoit très peu de soufre.

Il est possible que les sols sableux pauvres en matière organique et à pH faible présentent une carence en soufre. Le soufre sous forme de sulfate étant fortement soluble, il peut être emporté par lessivage. Les pertes de soufre peuvent se produire en même temps que les pertes de matière organique et par érosion de la couche arable.

Oligo-éléments

Les oligo-éléments sont aussi importants que les éléments nutritifs primaires et secondaires. Ils sont nécessaires aux végétaux en beaucoup plus petites quantités et sont souvent présents en moins grandes concentrations dans le sol. La nécessité de ces éléments nutritifs varie selon la culture, la variété, les conditions du sol et la gestion de l'exploitation. Le tableau 3–8, p. 86, indique les réactions générales de différentes cultures aux oligo-éléments.

Le recours aux oligo-éléments nutritifs a augmenté au fil du temps. Voici des raisons qui peuvent justifier des apports plus importants d'oligo-éléments :

- rendement constamment élevé des cultures, qui risquent d'avoir épuisé les réserves du sol;
- engrais de plus en plus raffinés, contenant de moins en moins d'impuretés, dont des oligo-éléments;
- agriculture spécialisée laissant de moins en moins de champs disponibles pour les épandages de fumier;
- dégradation et érosion du sol.

Zn Zinc

Le zinc est relativement immobile dans le sol, de sorte que le lessivage ne pose pas de problème.

Le zinc susceptible de devenir assimilable par les plantes se présente dans la solution de sol sous

forme d'ions Zn^{2+} . Il est fixé aux surfaces de l'argile, de la matière organique et des minéraux du sol sous forme de zinc échangeable ou d'un complexe incluant de la matière organique.

Voici les conditions qui peuvent nuire à la biodisponibilité du zinc :

- pH élevé, car le zinc forme alors des composés insolubles;
- adsorption sur les surfaces de l'argile, de la matière organique, des carbonates et des minéraux oxydés.

Le zinc est important au début de la croissance de la plante, ainsi que lors de la formation du grain et de la semence. Il joue un rôle dans la production de la chlorophylle et des glucides.

Carence en zinc

Les carences en zinc s'observent le plus souvent dans les sols à pH élevé, dans les sols où les concentrations de zinc sont minimales, par suite d'applications de grandes quantités de phosphore, dans les sols sableux ou dans les sols érodés ou nivelés où le sous-sol est exposé. Les carences peuvent également s'observer dans les sols organiques (terres noires).

Les carences en zinc sont rares dans les exploitations d'élevage, car le fumier contient généralement du zinc. Le fumier liquide de porcs, par exemple, peut contenir plus de 85 g de zinc/m³, tandis que le fumier solide de volaille peut en contenir plus de 200 g/tonne métrique.

Puisque le zinc est relativement immobile dans la plante, les symp-

tômes de carence se manifestent d'abord sur le jeune feuillage.

Symptômes de carence en zinc :

- Maïs
 - chlorose internervaire sur les nouvelles feuilles des jeunes plants;
 - bandes de pâles à blanches entre la bordure des feuilles et la nervure médiane dans la partie inférieure de la feuille;
 - en cas de carence grave, nouvelles feuilles naissant du verticille complètement blanches (bourgeon blanc).
- Légumineuses, y compris soya et luzerne
 - tiges courtes et minces, feuillage vert pâle bronzé avec taches jaunes et certaines nécroses;
 - chlorose internervaire qui se propage et nervures qui paraissent vert foncé (contrairement à la carence en manganèse, la chlorose laisse voir davantage de taches).
- Arbres fruitiers et fraises
 - chlorose des feuilles jeunes, halo vert le long des bordures en dents de scie des jeunes feuilles immatures;
 - bourgeons stériles, feuilles petites et formation de rosettes (petites feuilles basilaires se formant sur de courtes pousses terminales et latérales sur les pousses de l'année).
- Oignon
 - croissance rabougrie, feuillage rayé, tordu et jaune.

Toxicité du phosphore?

Les plantes souffrant d'une carence en zinc sont moins capables de réguler l'accumulation de phosphore, de sorte qu'elles en prélèvent trop. Voilà pourquoi l'analyse tissulaire décèle souvent une teneur élevée en phosphore chez les plantes présentant une carence en zinc.

Mn

Manganèse

La plus grande partie du manganèse prélevé par les plantes se présente sous forme d'ions Mn^{2+} . Dans le sol, le manganèse existe sous quatre formes principales : minérale, organique, échangeable et dissoute. Le sol contient de grandes quantités de manganèse, dont une faible partie seulement est assimilable.

Voici les facteurs qui influencent l'assimilabilité du manganèse :

- le pH, car la quantité de manganèse échangeable diminue rapidement avec l'augmentation du pH (la biodisponibilité est maximale à des pH de 5,0 à 6,5);
- une forte teneur en matière organique, qui réduit la quantité de manganèse assimilable et qui est particulièrement préoccupante dans les cultures légumières pratiquées dans des terres noires;
- un excès d'eau ou une mauvaise aération, qui amène une augmentation du manganèse soluble;

- les concentrations d'autres éléments nutritifs comme l'azote; par exemple, un engrais azoté qui a un effet acidifiant peut augmenter les prélèvements de manganèse.

Le manganèse intervient dans la photosynthèse et la production de chlorophylle. Il aide à activer les enzymes qui participent à la distribution des régulateurs de croissance à l'intérieur de la plante.

Carence en manganèse

La carence en manganèse s'observe le plus souvent dans le soya cultivé dans des sols à pH élevé et dans des cultures pratiquées sur des terres noires ou dans des sols riches en matière organique. Il peut aussi se produire de telles carences dans des champs récemment travaillés. Des pourritures des racines peuvent aussi causer des carences en manganèse. La croissance réduite des racines provoquée par le nématode à kyste du soya (NKS) peut aggraver les carences en Mn. Une carence en Mn accompagne de nombreuses maladies.

Symptômes d'une carence en manganèse :

- Soya, haricots blancs
 - conditions chlorotiques sur les jeunes feuilles;
 - nervures des feuilles qui restent vert sombre, tandis que le tissu internervaire jaunit (voir la troisième page de couverture).
- Petites céréales
 - coloration jaune pâle, rabougrissement des plants,

TABLEAU 3-8. Sensibilité des cultures aux apports d'oligo-éléments

	Manganèse	Bore	Cuivre	Zinc	Molybdène
asperge	faible	faible	faible	faible	faible
avoine	forte	faible	forte	faible	faible
betterave à sucre	forte	moy.	moy.	moy.	moy.
betterave rouge	forte	forte	forte	moy.	forte
blé	forte	faible	forte	faible	faible
bleuet	faible	faible	moy.		
brocoli, chou-fleur	moy.	forte	moy.		forte
carotte, panais	moy.	moy.	moy.	faible	faible
céleri	moy.	forte	moy.		faible
chou	moy.	moy.	moy.	faible	moy.
concombre	forte	faible	moy.		
épinard	forte	moy.	forte	forte	forte
haricots comestibles	forte	faible	faible	forte	moy.
laitue	forte	moy.	forte	moy.	forte
luzerne	faible	forte	forte	faible	moy.
maïs	moy.	faible	moy.	forte	faible
maïs sucré	forte	moy.	moy.	forte	faible
oignon	forte	faible	forte	forte	forte
orge	moy.	faible	moy.	faible	faible
pois	forte	faible	faible	faible	moy.
poivron	moy.	faible	faible		moy.
pomme de terre	forte	faible	faible	moy.	faible
radis	forte	moy.	moy.	moy.	moy.
seigle	faible	faible	faible	faible	faible
soya	forte	faible	faible	moy.	moy.
tomate	moy.	moy.	forte	moy.	moy.
trèfle	moy.	moy.	moy.	faible	forte

Les cultures affichant une forte sensibilité à un oligo-élément réagissent souvent à un apport de cet oligo-élément si la concentration de celui-ci dans le sol est faible. Les cultures affichant une sensibilité moyenne à un oligo-élément réagissent moins à un apport de cet oligo-élément, et les cultures dont la sensibilité est faible n'y réagissent habituellement pas, même lorsque le sol est très pauvre en cet oligo-élément.

Source : Michigan State University Publication E-486. *Secondary and Micronutrients for Vegetables and Field Crops*, 1994.

extrémités tardives qui deviennent grises ou blanches (tache grise de l'avoine).

- Betterave rouge, betterave à sucre
 - feuilles naines qui rous-sissent et s'enroulent.
- Laitue, céleri, oignon
 - jaunissement des feuilles, rabougrissement du plant et retard de maturité.

Une application foliaire effectuée en début de saison est un traitement plus efficace contre les carences en manganèse que les applications racinaires, car ces dernières convertissent rapidement le manganèse en des formes non assimilables.

Les apports de manganèse appliqués au sol peuvent être utiles dans des sols acides, sableux. Les applications en bandes sont plus fréquentes que les applications en pleine surface.

Nota : Dans le cas de la pomme Red Delicious et de certains cultivars de pêche, le manganèse peut devenir toxique dans les sols à texture grossière si le pH est inférieur à 5,0.

Les symptômes, appelés « taches rouges », prennent la forme de renflements de l'écorce sous lesquels se trouvent des taches brun foncé. Il est parfois possible de corriger le problème par des apports de chaux destinés à relever le pH.

B Bore

Le bore est présent dans le sol en solution, adsorbé et sous forme minérale. Le prélèvement du bore par les plantes est lié au pH. La biodisponibilité de cet élément est maximale à des pH entre 5,0 et 7,0. La biodisponibilité diminue en périodes de sécheresse.

Le bore joue un rôle important dans l'intégrité structurelle des parois cellulaires, la nouaison et le développement des graines, ainsi que dans le métabolisme des glucides et des protéines.

Nota : Il existe des écarts considérables entre les cultures quant à leurs besoins en bore et quant à leur tolérance à cet oligo-élément. La démarcation entre le carence et la toxicité est mince. Des symptômes de toxicité du bore ont été observés dans des cultures de maïs de semence et de maïs sucré ainsi que dans des cultures de soya succédant à des cultures de betterave rouge traitées au bore.

Utiliser le bore avec prudence en prêtant bien attention à la rotation des cultures.

Carence en bore

Les conditions propices aux carences en bore sont :

- sols secs;
- pH du sol extrêmes;
- sols pauvres en matière organique;
- sous-sol exposé ou érodé.

Les symptômes d'une carence en bore varient considérablement d'une plante à l'autre. Le bore ne se diffuse pas facilement à l'intérieur de la plante.

Symptômes d'une carence en bore :

- Rutabaga
 - centre creux, zones brunes aqueuses (centre aqueux).
- Céleri
 - tige fendillée à rayures brunes (griffures de chat), cœur noirci.
- Choux maraîchers
 - tiges creuses, pommes brunes, bourgeons déformés.
- Pomme
 - fruit petit, aplati ou mal formé, nombre réduit de pépins, liège interne, craquelure et roussissure du fruit, bourgeons terminaux morts, feuilles naines, cassantes, raides, s'enroulant vers le bas, flétrissement des bouquets floraux.
- Luzerne
 - feuilles supérieures jaune rougeâtre, entre-nœuds courts, faible grenaison, feuilles terminales en rosette, bourgeons terminaux morts (voir la troisième page de couverture).
- Betterave à sucre, betterave rouge, épinard
 - jaunissement des feuilles, taches, craquelure des racines.

- Céréales
 - incidence accrue de l'ergot.

Cu **Cuivre**

Le cuivre est présent dans la solution de sol, sur les sites d'échange de l'argile et de la matière organique, dans les oxydes du sol, les résidus biologiques et les organismes vivants. Une forte proportion, soit de 20 % à 50 % dans certains sols, est retenue sous des formes fixées à la matière organique.

Voici les facteurs qui influencent la biodisponibilité du cuivre :

- texture, car les concentrations de cuivre sont plus faibles dans les sables;
- le pH du sol, du fait que la mobilité du cuivre diminue à mesure que le pH augmente;
- la teneur du sol en matière organique, la biodisponibilité étant extrêmement faible dans les sols organiques et peut également être faible dans les sols à très faible teneur en matière organique.

Certains éléments nutritifs comme le zinc, l'aluminium, le phosphore et le fer, s'ils sont présents en fortes concentrations, réduisent le prélèvement du cuivre par les plantes.

Le cuivre joue un rôle dans la production de la chlorophylle, agit comme catalyseur pour les enzymes, et interviendrait peut-être dans la suppression des maladies.

Nota :

Le cuivre est nécessaire dans les rations servies aux porcs, à la volaille et aux bovins, mais il est toxique pour l'agneau, même à des concentrations assez faibles.

Depuis quelques années, l'épandage de fumier de porcs sur des terres utilisées pour la production de foin ou le pâturage soulève des inquiétudes quant à la toxicité du cuivre pour les élevages de moutons. Le fumier de porcs contient de 2 à 50 ppm et plus de cuivre, la moyenne se situant dans les 10 ppm. Comme les plantes fourragères ou de pâturage prélèvent le cuivre, elles risquent d'être toxiques pour les moutons qui les consomment. Le cuivre peut s'accumuler dans les sols qui font l'objet d'épandages répétés de fumier de porcs.

Carence en cuivre

Les carences en cuivre se rencontrent le plus souvent dans les cultures pratiquées sur des sols organiques (terres noires) et dans des sols sableux bien drainés à pH élevé.

Symptômes d'une carence en cuivre :

- Carotte
 - racine pâle.
- Oignon
 - dépérissement du bout des tiges qui deviennent étroites et tirebouchonnées, tuniques minces et jaune pâle.
- Céréales
 - tirebouchonnement (les pointes des feuilles meurent et peuvent s'enrouler et se tirebouchonner);
 - retard dans l'élongation des tiges;
 - absence d'épis;
 - les grains formés peuvent présenter une teneur exceptionnellement élevée en protéines.
- Laitue
 - feuilles manquant de fermeté, tiges jaune délavé.

Depuis que des carences en cuivre ont été observées dans l'Ouest canadien au début des années 1980, des chercheurs ont identifié des millions d'acres de terres dans les Prairies qui présentent une carence en cet élément nutritif indispensable.



Chlore

Le chlore se trouve généralement dans la nature sous forme de chlorure (Cl^-). Le chlorure est facilement soluble, très mobile et prélevé sans difficulté par les végétaux. Les sols de l'Ontario renferment peu de chlore, celui-ci étant emporté par lessivage. On trouve par contre des concentrations plus élevées de chlore dans le bas des pentes, là où l'eau s'accumule. Par conséquent, l'analyse des tissus végétaux dans ces zones révèle des teneurs plus élevées en chlore.

La biodisponibilité du chlore n'est aucunement influencée par le pH du sol. Les végétaux prélèvent et accumulent moins de chlorure quand

« ... ure », toute une différence

Chlore ou chlorure

On s'inquiète des effets du chlore présent dans les fertilisants, notamment du chlorure de potassium, sur les bactéries du sol. En fait, les engrais renferment du chlorure.

Chlore et chlorure sont différents et ne s'utilisent pas de façon interchangeable. Leur comportement et leurs réactions dans le sol, ainsi que leurs effets sur les plantes et les micro-organismes sont totalement différents.

Le chlore (Cl_2) est un gaz corrosif et toxique qui sert à la fabrication des javellisants et des désinfectants. Dissous dans l'eau, le chlore gazeux forme un ion hypochlorite (l'ingrédient actif de l'eau de Javel). Le chlore liquide commercial (chlore gazeux comprimé) sert à la destruction des bactéries dans l'épuration des eaux. À la fois l'hypochlorite et le chlore sont des bactéricides efficaces.

Le chlorure (Cl^-), par ailleurs, est la forme ionique du chlore qu'on retrouve dans la nature. Il est chargé négativement et est le plus souvent associé au sodium (sel de table) ou à d'autres ions à charge positive comme le potassium. Il n'est pas toxique et est facilement assimilable et utilisé par les plantes.

Comparer les concentrations de chlore et de chlorure dans l'eau. Le sel de mer, qui est fécond pour la vie bactérienne, renferme des niveaux de chlorure de l'ordre de 20 000 ppm. Les usines d'épuration des eaux visent habituellement des concentrations de chlore de 1,7 ppm afin de désinfecter l'eau.

Source : Eric Bosveld, The Agromart Group.

les concentrations de nitrates et de sulfates sont élevées.

Le chlorure des plantes joue un rôle important dans la régulation stomatale et la circulation de l'eau. Le chlorure participe également à la photosynthèse. D'après des recherches menées à l'extérieur de l'Ontario, le chlorure faciliterait la suppression du piétin et de la rouille des feuilles, des infections à *Septoria* dans le blé et l'orge, ainsi que de la pourriture des tiges du maïs. Des apports de potassium sous forme de chlorure de potas-

sium peuvent fournir suffisamment de chlorure pour procurer ces avantages. Des essais de démonstration menés en Ontario laissent croire à un léger avantage sur le plan du rendement à faire des apports de chlorure en même temps que les apports d'azote dans les cultures de blé d'automne.

Certains arbres fruitiers et ronces sont sensibles aux chlorures, particulièrement au stade de plantules. Les chlorures posent également problème pour le tabac, dont ils affectent la qualité.

Fe

Fer

Le fer est abondant dans la plupart des sols, mais il a une solubilité très faible. La forme assimilée par les plantes est l'ion ferreux (Fe^{2+}). Le fer remplit un certain nombre de fonctions chez les végétaux. Le fer :

- agit comme catalyseur dans la formation de la chlorophylle;
- est nécessaire à la respiration des plantes;
- joue un rôle dans la formation de certaines protéines.

Le fer est surtout utilisé par les gazonnières et les pépinières qui s'en servent pour donner une teinte vert sombre au feuillage.

Carence en fer

Les carences en fer sont rares en Ontario. Par contre, les sols ayant un pH supérieur aux recommandations qui servent à la culture du bleuet ou du rhododendron peuvent présenter une carence en fer.

Voici quels sont, ailleurs dans le monde, les facteurs liés aux carences en fer :

- déséquilibre avec d'autres métaux comme le molybdène, le cuivre ou le manganèse;
- excès de phosphore dans le sol;
- génétique des plantes;
- faible teneur en matière organique du sol;
- combinaison de pH élevé ($> 7,8$), de forte teneur en chaux, de sols humides et froids et de fortes concentrations de bicarbonate (chlorose induite par la chaux).

Symptômes d'une carence en fer :

- Bleuet, rhododendron
 - feuilles jeunes affichant une chlorose internerveaire ou des rayures sur toute leur longueur;
 - dans les cas graves, rabougrissement du plant.

Ces cultures donnent leur meilleur dans des sols acides, car elles ont un besoin élevé en fer.

Mo

Molybdène

Le molybdène est présent dans le sol sous forme non échangeable, dans les minéraux du sol, sous forme échangeable, dans les oxydes de fer et d'aluminium présents dans la solution de sol et fixés à la matière organique.

La biodisponibilité du molybdène est influencée par :

- le pH du sol, car le molybdène s'assimile plus facilement à mesure que le pH augmente (la chaux peut améliorer la biodisponibilité dans les sols acides);
- les oxydes d'aluminium et de fer, car le molybdène est fortement adsorbé sur ces métaux, ce qui le rend moins facilement assimilable.

Les plantes prélèvent le molybdène sous forme de molybdate (MoO_4^{2-}). Le phosphore en favorise le prélèvement. Toutefois, dans les sols à faible teneur en eau, les carences sont à craindre, car l'écoulement de masse et la diffusion se trouvent alors compromis. Il existe en outre des différences appréciables dans la

sensibilité aux faibles concentrations de molybdène d'une espèce à l'autre et d'un cultivar à l'autre.

Le molybdène joue un rôle important dans le métabolisme de l'azote, à l'intérieur de la plante, ainsi que dans la fixation de l'azote chez les légumineuses. Il joue également un rôle dans la viabilité du pollen et la production de semence.

Symptômes d'une carence en molybdène :

- Légumineuses
 - formation insuffisante de nodosités, symptômes de carence en azote.
- Choux maraîchers
 - premiers symptômes analogues aux carences en azote ou en soufre : feuilles jaune pâle ou vert pâle, plantes rabougries présentant parfois des taches jaunes;
 - petites zones nécrotiques sur le tissu foliaire, suivies de roussissures et d'un enroulement vers le haut du pourtour supérieur des feuilles (tige en fouet chez le chou-fleur).

Ni

Nickel

Les plantes prélèvent le nickel sous forme d'ions Ni^{2+} . En fortes concentrations dans le sol, le nickel peut provoquer l'apparition de symptômes de carence en zinc ou en fer en raison de la compétition entre ces cations. Le nickel est un élément nutritif indispensable aux

légumineuses. Il est important dans la transformation de l'azote, étant l'une des composantes de l'enzyme uréase. Aucune carence en nickel n'a été observée dans des terres agricoles.

Minéraux non essentiels

Même s'ils ne sont pas absolument indispensables à la croissance de toutes les plantes, les éléments nutritifs non essentiels peuvent l'être pour certaines ou pour le développement des animaux. Ils peuvent également poser un problème si leurs concentrations dans le sol atteignent des niveaux toxiques, s'ils tuent ou endommagent la plante ou transmettent une toxine à l'homme ou aux animaux qui consomment la plante.

Minéraux bénéfiques

Cobalt

Le cobalt (Co) joue un rôle dans la formation de la vitamine B_{12} et stimule la croissance des organismes fixateurs d'azote, comme les bactéries du genre *Rhizobium* et les algues. Le cobalt a également un rôle dans la formation de la vitamine B_{12} chez les ruminants.

Sodium

Le sodium (Na) joue un rôle dans la régulation osmotique, facilitant le contrôle de la circulation de l'eau vers la plante et hors de celle-ci. Chez certaines plantes, dans des sols pauvres en potassium, le sodium peut remplir certaines fonctions du potassium.

Le sodium peut être toxique pour les plantes. Il est rare que de fortes concentrations de sodium soient observées dans les sols de l'Ontario compte tenu des fortes précipitations et du lessivage intense qui surviennent au printemps et à l'automne. Les zones à fortes concentrations de sodium sont habituellement associées aux anciens puits de pétrole ou à des déversements de saumure. La croissance végétale est réduite dans ces zones, en raison de la toxicité d'un excès de sodium et de la structure impropre des sols sodiques.

Silicium

Le silicium (Si) peut constituer jusqu'à 40 % des sols sableux non météorisés. Les graminées contiennent de dix à vingt fois plus de silicium que les légumineuses et autres plantes à larges feuilles.

D'après les travaux publiés, le silicium réduirait l'ombrage dans les champs en favorisant une croissance érigée, en diminuant la verse, en augmentant la résistance aux parasites racinaires et aux maladies des feuilles et des racines et en empêchant la toxicité de certains éléments nutritifs.

Vanadium

À de faibles concentrations, le vanadium (V) est bénéfique aux micro-organismes, même si rien n'indique qu'il soit indispensable à la croissance des cultures. On pense qu'il remplit certaines fonctions dans la fixation de l'azote et qu'il peut jouer un rôle dans les réactions d'oxydation et de réduction biologiques.

Sélénium

Même si le sélénium (Se) n'est pas nécessaire aux végétaux, il doit se retrouver dans les aliments pour animaux afin que ces derniers restent en santé. Une carence en sélénium provoque la maladie du muscle blanc (forme de dystrophie musculaire) chez des animaux comme les bovins et les ovins. On retrouve de fortes concentrations de sélénium dans les sols de certaines régions d'Amérique du Nord à climats semi-arides ou arides comme la Californie. Toutefois, presque partout en Ontario, les sols affichent des carences en sélénium; aussi faut-il en ajouter aux aliments pour animaux ou en administrer par injection aux animaux pour les maintenir en santé. On peut aussi l'épandre comme fertilisant, mais cette pratique étant coûteuse, elle est rare en Ontario.

Il semble que les problèmes liés aux carences en sélénium chez les animaux d'élevage soient plus fréquents à la suite de saisons de croissance froides et pluvieuses qu'à la suite de conditions de chaleur et de sécheresse. L'usage d'engrais azotés pour augmenter le rendement des cultures fourragères réduit la teneur en sélénium des aliments pour animaux. La plante prélève la même quantité de sélénium, mais celui-ci se diffuse dans une plante plus grosse et davantage de biomasse, d'où une dilution de cet élément.

Éléments indésirables

Plomb

Le plomb (Pb) est un métal lourd habituellement associé aux déchets industriels, mais il peut être prélevé par les plantes. Les symptômes de toxicité sont analogues à ceux qui accompagnent les carences en fer, soit un jaunissement de la plante et une chlorose internervaire.

L'accumulation de plomb dans les tissus humains constitue un problème grave. L'empoisonnement au plomb résulte d'une exposition à ce métal causée soit par l'ingestion accidentelle de produits ménagers, le contact avec des peintures à base de plomb dans les vieilles maisons, ou l'inhalation de poussière chargée de plomb pendant des travaux de construction. Pour plus de renseignements sur l'empoisonnement au plomb, communiquer avec l'unité sanitaire locale.

Mercure et cadmium

Le mercure (Hg) et le cadmium (Cd) sont des métaux lourds qui peuvent s'accumuler dans les tissus. De façon générale, ils ne posent pas de problème aux plantes, mais leur accumulation dans les tissus humains et animaux peut être lourde de conséquences.

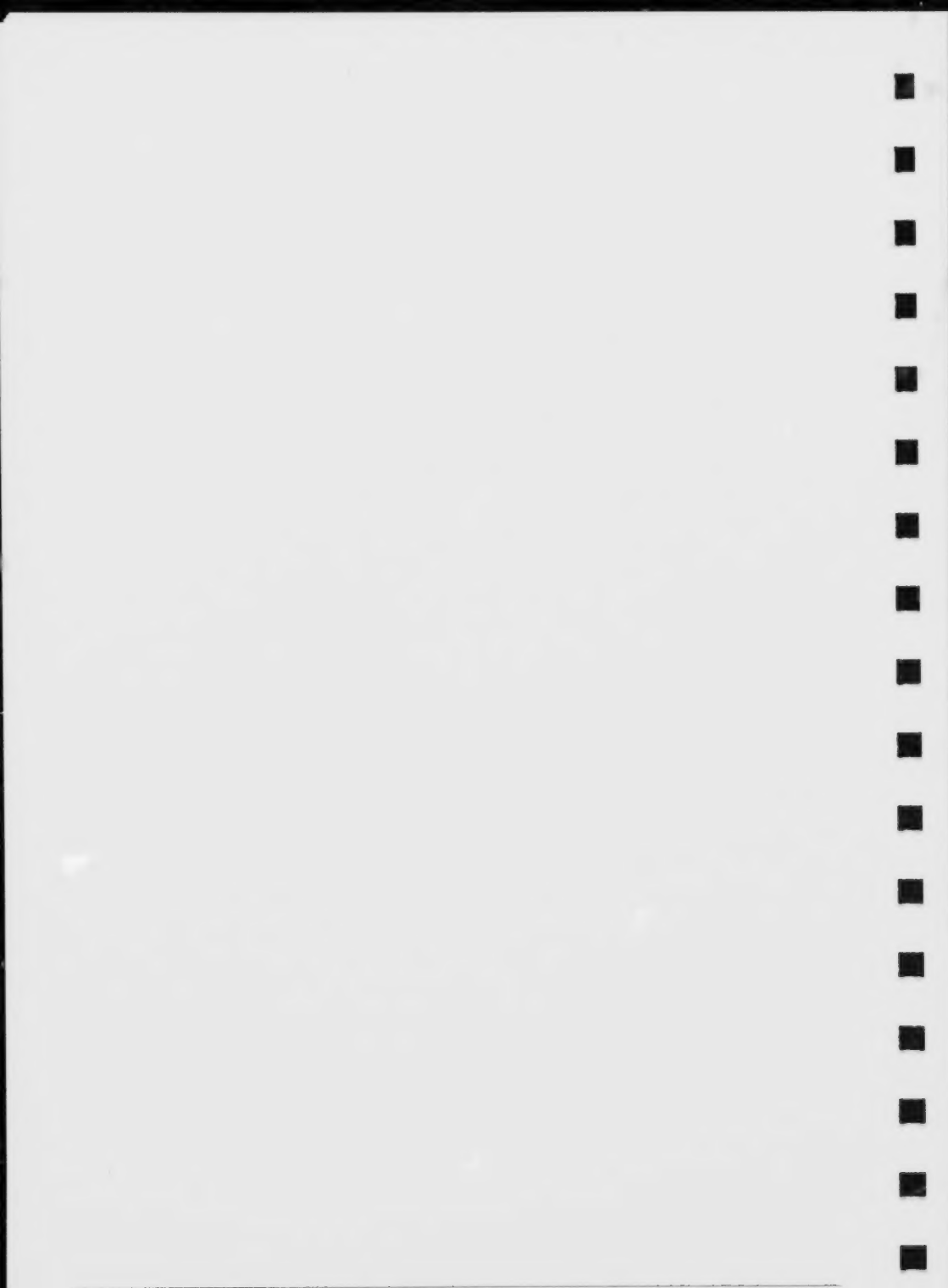
Ce sont les concentrations de métaux lourds dans les boues d'épuration qui déterminent si celles-ci se prêtent à des épandages sur des terres agricoles, et quels seront les taux d'application et la fréquence des applications. Ces métaux ne se déplacent pas et ne se laissent pas éliminer sauf dans les tissus végétaux, de sorte qu'ils s'accumulent dans le sol.

Bibliographie

- Bennett, W.F., ed., 1993. *Nutrient Deficiencies and Toxicities in Crop Plants*. American Phytopathological Society.
- Havlin, J. L., J. D. Beaton, S. L. Tisdale et W. L. Nelson, 2005. *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. 7th ed. Pearson Education Inc., Upper Saddle River, New Jersey 07458.
- Hoelt, Robert, 2002. « Nitrogen Loss for 2002 », dans *University of Illinois Pest & Crop Bulletin* (02-03-05).
- Ozgen, S., J.P. Palta et M.D. Kleinhenz, 2006. *Influence of Supplemental Calcium Fertilization on Potato Tuber Size and Tuber Number*. ISHS Acta Horticulturae 619: XXVI International Horticultural Congress: Potatoes, Healthy Food for Humanity: International Developments in Breeding, Production, Protection and Utilization.
- Ro, C.U., R.J. Vet, et J. Narayan, 2006. *Analyzed data fields from the National Atmospheric Chemistry Database (NAChem) and Analysis Facility*. Atmospheric Science and Technology Directorate, Science and Technology Branch, Environment Canada, 4905 Dufferin St., Toronto, Ontario, Canada M3H 5T4.
- Secondary and Micronutrients for Vegetables and Field Crops*, août 1994. Michigan State University extension E-486.
- Sprague, Howard D., réd., 1964. *Hunger Signs in Crops*. David McKay Company Inc.

Pour plus de détails

- Barber, Stanley A., 1995. *Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach*. John Wiley and Sons, Inc.
- Marschner, Horst, 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2nd ed. Academic Press.



4 pH DU SOL, CHAULAGE ET ACIDIFICATION

Les effets du pH sur la croissance des plantes sont surtout indirects. Comme le montre la figure 4-1, l'acidité du sol influence la biodisponibilité des éléments nutritifs. Elle peut entraîner l'élévation de la concentration de certains éléments jusqu'à des niveaux toxiques. Elle peut également avoir des effets sur l'activité des organismes terricoles à qui l'on doit la structure du sol, le recyclage de la matière organique ou la fixation de l'azote dans les nodosités des racines des légumineuses. Le pH du sol peut avoir des effets considérables sur l'efficacité et la décomposition de certains pesticides.

Les espèces végétales n'ont pas toutes les mêmes exigences ni la même tolérance à l'égard des conditions du sol qui résultent de régimes de pH différents, tout comme elles n'ont pas les mêmes besoins ni la même tolérance en ce qui a trait aux différentes conditions d'humidité du sol. Une saine gestion du sol commence par la correction des problèmes de pH.

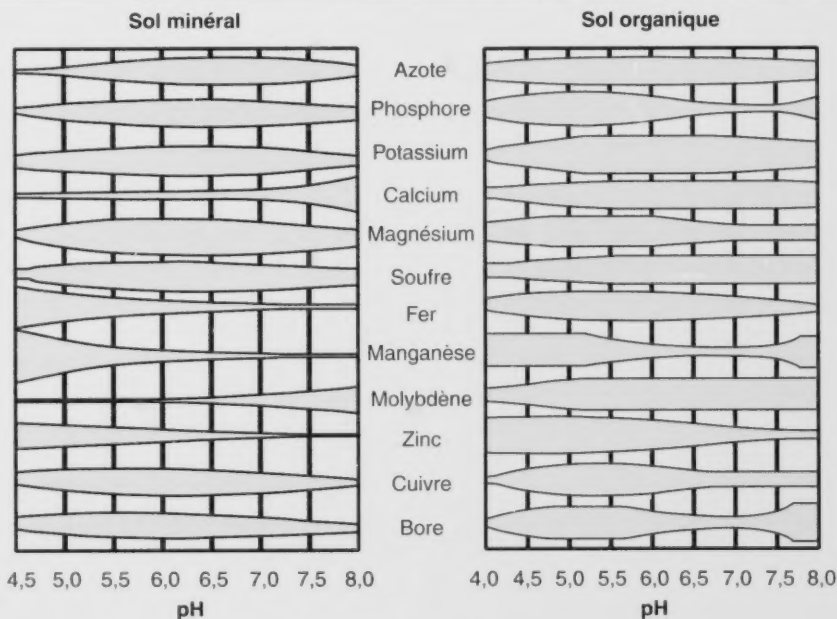
De façon générale, les végétaux ne prélèvent les éléments nutritifs que si ces derniers sont dissous dans l'eau. Le pH du sol influence la solubilité des éléments, qu'il s'agisse d'éléments nutritifs pour les végétaux ou d'autres éléments. Certains éléments nutritifs sont plus solubles à un pH élevé, d'autres le sont à un

pH faible, tandis que d'autres encore le sont à des fourchettes de pH intermédiaires.

Plus le pH diminue, plus l'aluminium se dissout facilement. L'aluminium n'est pas un élément nutritif pour les végétaux, mais un composant important de la fraction minérale des sols (argile, limon et sable). Sous forme dissoute, l'aluminium réagit avec les composés phosphoriques en solution, les rendant insolubles et par conséquent non assimilables par les plantes. À des pH de 5,5 ou moins, les concentrations d'aluminium dissous peuvent atteindre des niveaux toxiques pour certaines espèces intolérantes. Si les concentrations d'aluminium sont élevées, elles restreignent la formation des nodosités fixatrices d'azote sur les racines des légumineuses. Le manganèse, qui est un élément nutritif pour les végétaux, peut également atteindre des niveaux toxiques à des pH inférieurs à 5,0 dans certains sols et pour des espèces non tolérantes.

Si le pH du sol est élevé (au-dessus de 7,5), il faut ajouter des éléments nutritifs pour compenser les effets du pH, car pour de nombreuses cultures, il n'est pas rentable de réduire le pH du sol. On peut adopter la même approche pour les sols à pH faible si la toxicité ne pose pas problème, mais il est plus rentable de corriger le pH du sol par

FIGURE 4-1. Effets du pH du sol sur la biodisponibilité des éléments nutritifs dans les sols minéraux et les sols organiques



Adaptation de : *Soil Fertility, Second Edition* (©1997), H.D. Foth et B.G. Ellis.
Reproduction autorisée par Routledge/Taylor & Francis Group, LLC.

chaulage que d'essayer de résoudre de multiples carences nutritives par des apports de fertilisants. Des pH du sol de neutres à élevés peuvent avoir des effets néfastes sur certaines cultures, comme le bleuet. Si le pH est supérieur à 6,5, il favorise la galle de la pomme de terre.

Les composés d'aluminium, de manganèse et de fer abondent dans les sols minéraux, mais non dans les sols organiques (terres noires et sols tourbeux). Dans les sols organiques, ces composés ne nuisent donc pas à la solubilité d'autres éléments nutritifs. Par conséquent, les pH du sol faibles sont plus acceptables pour les sols organiques que pour les sols minéraux.

Facteurs d'augmentation de l'acidité des sols

Précipitations

L'eau de pluie pure est légèrement acide en raison du dioxyde de carbone qui s'y trouve dissous et qui forme de l'acide carbonique. Elle renferme aussi d'autres acides, dont de l'acide nitrique et de l'acide sulfurique, en quantités plus faibles, variant selon l'importance de la pollution atmosphérique. L'accumulation sur des milliers d'années de tels acides qui pénètrent dans le sol sous l'effet des eaux de percolation, engendrant une réduction graduelle du pH du sol en

surface. Il s'agit d'une étape normale du développement des sols sous les climats humides.

En général dans le sud de l'Ontario, les dépôts acides (pluie acide, neige acide et dépôts secs) ne participent pas tellement aux baisses de pH, en raison de la capacité des sols agricoles de résister aux changements de pH et en raison de la faible quantité d'acide déposée.

Contrairement aux sols agricoles, nombre de plans d'eau, particulièrement ceux qui sont situés sur les roches ignées du Bouclier canadien, ne résistent que peu ou pas du tout aux changements de pH. Les dépôts acides sont donc beaucoup plus inquiétants pour les réseaux aquatiques et les sols peu profonds du Bouclier canadien que pour les sols agricoles.

Décomposition de la matière organique

Au fur et à mesure qu'elle se décompose, la matière organique libère des acides organiques dans le sol. Ce processus contribue à la réduction du pH du sol dans les horizons superficiels, là où se trouve le gros de la matière organique.

Matériau d'origine

Les principaux facteurs liés aux sols qui pourraient influencer le taux de diminution du pH sont le pH de départ, la quantité de matière organique dans le sol et la quantité et le type d'argile. Les sols minéraux à pH allant de neutre à élevé, riches en matière organique et à forte teneur en argile ont un meilleur pouvoir tampon que les sols à

texture grossière, ce qui freine la diminution du pH. Les sols qui renferment de fortes concentrations de chaux libre (minéraux carbonatés) neutralisent l'acidité et résistent à la diminution du pH du sol jusqu'à épuisement de la chaux. Les sols à texture grossière pauvres en matière organique et à pH de 5 à 6 n'ont qu'une faible capacité de résister à un changement de pH.

Épandage d'engrais

La conversion microbienne de l'azote ammoniacal en azote des nitrates est l'un des processus biologiques qui libèrent de l'acide dans le sol. L'apport de grandes quantités d'engrais contenant de l'ammonium peut accélérer la baisse du pH, particulièrement dans les sols sableux renfermant peu de matière organique.

L'urée et l'ammoniac anhydre ne renferment pas d'azote ammoniacal, mais sont convertis en azote ammoniacal en contact avec le sol. Le pH des sols sableux recevant de l'azote sous forme d'ammonium, d'ammoniac ou d'urée provenant d'engrais ou de fumier doit être contrôlé périodiquement.

Alcalinisation du sol

Lorsque les glaciers se sont retirés de l'Ontario, il y a dix mille ans, les matériaux laissés derrière présentaient un pH uniforme, depuis la surface jusqu'à la profondeur à laquelle il y avait changement dans la texture des matériaux. Les matériaux ont été déposés directement par les glaciers, l'écoulement des

eaux de fonte du front glaciaire en retraite ou décantés des eaux des lacs post-glaciaires. Ce sont ces matériaux qui ont donné nos sols agricoles. Pour la plupart, ces matériaux avaient un pH allant de neutre à basique.

Les mécanismes d'acidification des sols sont présents dans les couches du sol les plus proches de la surface. Sur des milliers d'années, les couches superficielles acidifiées se sont épaissies, à mesure qu'augmentait la profondeur des processus biologiques et que les bases étaient entraînées par la percolation des eaux dans le sol. Il en est resté des profils de sol à acidité décroissante (alcalinité croissante) avec la profondeur.

Nombre des sols agricoles de l'Ontario sont alcalins (pH supérieur à 7) à des profondeurs de seulement 30 cm ou plus, leur pH pouvant atteindre jusqu'à 8,2 à environ 1 m. Par conséquent, pour la plupart, les sols agricoles de l'Ontario offrent aux plantes amplement de réserves d'éléments nutritifs basiques comme le calcium et le magnésium dans la zone racinaire.

Si le pH du sol augmente au cours d'une série d'analyses de sol, voici les causes probables :

- La profondeur de prélèvement des échantillons a changé. Il est beaucoup plus facile de prélever des échantillons de sols à plus grande profondeur si le sol est humide et friable que lorsqu'il est sec ou compacté.
- Le travail du sol mélange de la terre provenant d'un horizon plus profond avec le sol à

échantillonner. Certains agriculteurs y voient un moyen de relever le pH sans procéder au chaulage, mais cette pratique est rarement efficace pour modifier le pH de façon souhaitable. Les effets néfastes de la dilution du contenu en matière organique de la surface du sol avec le sous-sol et sur la structure du sol doivent être pris en compte.

- L'excavation de fossés, le drainage par canalisations enfouies ou le nivellement du sol a exposé le sous-sol qui fait désormais partie de l'échantillon de sol.
- L'érosion retire les couches superficielles les plus acides. L'affaissement du sol (oxydation, tassement et disparition) d'une couche de terre noire sus-jacente à un sol minéral a le même effet.

En Ontario, les précipitations sont supérieures aux pertes d'eau par évaporation et transpiration. Le déplacement net d'eau dans le sol se fait vers le bas et le mouvement net des cations basiques, vers le haut (bien que très lentement dans tous les sols, sauf les sols à texture grossière).

Les dépôts et les sols alcalins (saturés en sodium) s'observent dans les régions sèches comme les Prairies, où l'évaporation et la transpiration végétale dépassent les précipitations. Le résultat est que le mouvement net de l'eau est vers le haut, transportant les cations basiques à la surface et rendant celle-ci plus alcaline.

Traitement des sols à pH élevé

Évaluer le pH du sol. La fourchette optimale de pH du sol pour la plupart des cultures est de 6,0 à 7,5. Même au delà de 7,5, l'effet sur les grandes cultures est négligeable dans la plupart des cas. La biodisponibilité du phosphore est alors légèrement réduite, comme le révélera le dosage du phosphore. Tant que les concentrations de phosphore restent raisonnables, elles ne devraient pas avoir d'effets négatifs sur les cultures. Épandre les engrais phosphorés en bandes afin de réduire l'immobilisation de cet élément.

Ne pas essayer de réduire le pH des sols alcalins. Si le pH du sol est très élevé (7,8 à 8,2), c'est que le sol renferme une forte concentration de chaux libre (carbonate de calcium). Son pouvoir tampon est alors extrêmement élevé, au point de faire avorter toute tentative d'abaisser le pH. L'apport de soufre pour acidifier le sol ne donnerait pas les résultats escomptés et coûterait cher.

Éviter que le pH n'augmente davantage. Étant donné que, dans la plupart des cas, les pH élevés sont attribuables à l'érosion du sol ou à un travail excessif du sol, un programme de travail réduit du sol contribuera à maintenir en place la couche arable et à éviter que le sous-sol ne remonte à la surface.

Surveiller les cultures pour y déceler tout signe de carences en éléments nutritifs découlant d'un pH élevé. Le plus souvent, ces carences sont des carences en manganèse dans le soja ou les céréales, et des carences en zinc dans le maïs. Si on

constate une carence en manganèse, on doit envisager une application foliaire. Dans le cas d'une carence en zinc, ajouter du zinc à l'engrais de démarrage.

Symptômes de problèmes liés au pH

L'un des principes d'une bonne gestion du sol consiste à ramener le pH du sol à l'intérieur de la fourchette optimale pour les cultures pratiquées, puis à s'attaquer aux questions de fertilité du sol.

Les analyses de sol sont le seul moyen fiable de savoir si le pH a besoin d'être corrigé.

Toutefois, certaines zones d'un champ peuvent dénoter des symptômes de pH faible, même si le pH moyen du champ est acceptable. Ces zones, souvent des collines sableuses, doivent faire l'objet d'analyses distinctes.

Voici quelques symptômes qui peuvent indiquer un problème de pH :

- faible nodulation des légumineuses fourragères, malgré l'inoculation des semences (une coloration vert pâle est le signe d'une nodulation déficiente);
- récolte d'avoine seulement dans ce qui devait être un peuplement mixte de céréales (l'orge étant plus sensible aux sols acides);
- faible persistance des fourrages vivaces malgré une fertilisation et un drainage adéquats;
- présence de mousses et de mauvaises herbes, telles que

pH du sol dans les bandes d'engrais de démarrage

Les engrais épandus en bandes n'ont pas tous les mêmes effets sur le pH au moment où ils commencent à se dissoudre. Le phosphate diammonique (PDA) et l'urée élèvent au départ le pH, mais uniquement s'ils sont concentrés dans une bande. Le pH accru rend l'ammoniac plus volatile et peut endommager les jeunes plantules. Par unité d'azote, toutefois, le PDA présente un moins grand risque de blessure par l'ammoniac que l'urée. Néanmoins, dans les sols de l'Ontario qui, pour la plupart, ont un pH élevé, il est normalement recommandé de ne pas placer d'urée ni de PDA avec la semence de maïs. Là où les risques de dommages causés par l'ammoniac sont grands (sols à texture légère souffrant de sécheresse ou pH supérieurs à un pH neutre), il y a lieu de limiter l'épandage de PDA ou d'urée en bandes à proximité (par exemple, à 5 cm au-dessous et à côté) des plantules.

L'acidité dans une bande de P comporte en théorie des avantages liés à l'amélioration de la biodisponibilité du P dans les sols dont le pH est neutre ou plus élevé. Après quelques semaines, le pH diminue dans une bande renfermant de l'azote ammoniacal, sous l'effet de la nitrification (conversion de l'azote ammoniacal en azote des nitrates) qui rend le sol acide. Le pH plus faible dans la bande peut améliorer la biodisponibilité du P et de plusieurs oligo-éléments (dont le cuivre, le manganèse et le zinc) en plus de constituer une région particulière dans le sol où le système racinaire a accès à un équilibre différent d'éléments nutritifs biodisponibles.

fraisier des champs, épervière
orangée, petite oseille;

- faible rendement des herbicides
radiculaires à base de tria-
zines, comme l'atrazine et la
métribuzine;
- rémanence accrue de l'imazé-
thapyr (Pursuit).

Éviter d'établir un diagnostic
uniquement sur la foi de ces symp-
tômes. Toujours faire confirmer les
problèmes de pH par une analyse
de sol.

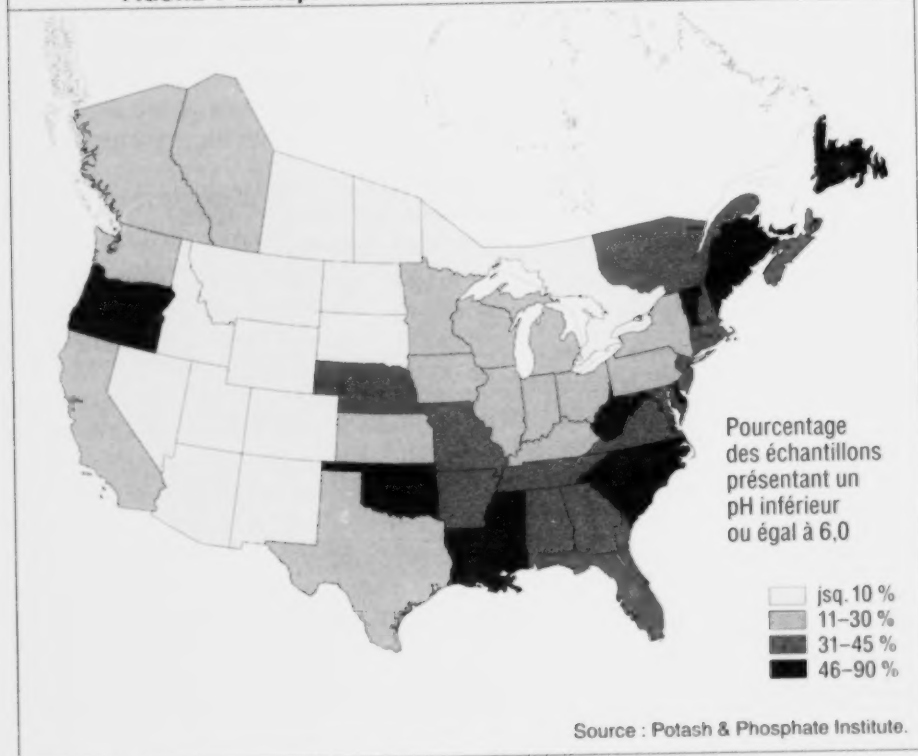
La figure 4-2 montre la préva-
lence des sols acides dans les États
et provinces d'Amérique du Nord.

pH tampon

Le pH tampon (pouvoir tampon) du
sol s'entend de la capacité de ce sol
à résister aux fluctuations du pH.
Dans un sol acide, cette capacité est
due à une acidité de réserve. Cette
acidité de réserve est attribuable
à hydrogène, à l'aluminium et à
d'autres cations retenus dans le
complexe d'échanges cationiques.
Plus l'acidité de réserve est éle-
vée, plus il faudra de chaux pour
ramener le pH dans une fourchette
optimale.

Les sols n'ont pas tous le même
pouvoir tampon, car celui-ci dépend
surtout de la quantité et du type
d'argile du sol, de la teneur du sol
en matière organique et de la satu-
ration en bases des sites d'échange
cationique. Une simple mesure du

FIGURE 4-2. Répartition des sols acides en Amérique du Nord



pH du sol ne renseigne pas sur la capacité du sol à résister aux changements de pH.

Le pH tampon est une mesure prise après que l'échantillon de sol a été mélangé avec une solution tampon. La solution elle-même résiste aux fluctuations du pH. Pour plus de détails, voir p. 26.

Le pH résultant de l'interaction entre la solution tampon et le sol permet d'établir avec précision la quantité de chaux nécessaire pour rajuster le pH du sol à un niveau cible. La détermination du pH tampon est un moyen simple, peu coûteux et précis d'établir les besoins en chaux.

Les recommandations découlant du dosage des éléments nutritifs effectué lors des analyses de sol reposent sur la relation entre les concentrations révélées par les analyses de sol et la réaction des cultures à l'apport d'éléments nutritifs. La mesure du pH tampon diffère en ce qu'il établit un lien entre les concentrations d'éléments nutritifs dans le sol et la réaction du sol à l'apport de chaux.

La recommandation de chaulage proprement dite dépend du pH cible pour la culture ainsi que du pH tampon. Les fourchettes de pH optimales peuvent être différentes selon les cultures.

Après avoir déterminé le pH cible, consulter un tableau précisant les besoins en chaux. Voir le tableau 4-1.

Étant donné que l'aluminium devient toxique lorsque le sol est acide, certains sont d'avis que les

sols doivent être chaulés pour neutraliser la quantité d'aluminium échangeable. Cette méthode n'est pas meilleure et pourrait même être pire que l'apport de chaux déterminé en fonction du pH tampon.

TABLEAU 4-1. Chaux nécessaire pour corriger l'acidité du sol d'après le pH et le pH tampon du sol

pH tampon	pH cible du sol* = 7	pH cible du sol = 6,5 (chaux si pH inférieur à 6,1)	pH cible du sol = 6,0 (chaux si pH inférieur à 5,6)	pH cible du sol = 5,5 (chaux si pH inférieur à 5,1)
Calcaire broyé nécessaire — t/ha (en fonction d'un indice agricole de 75)				
7,0	2	2	1	1
6,9	3	2	1	1
6,8	3	2	1	1
6,7	4	2	2	1
6,6	5	3	2	1
6,5	6	3	2	1
6,4	7	4	3	2
6,3	8	5	3	2
6,2	10	6	4	2
6,1	11	7	5	2
6,0	13	9	6	3
5,9	14	10	7	4
5,8	16	12	8	4
5,7	18	13	9	5
5,6	20	15	11	6
5,5	20	17	12	8
5,4	20	19	14	9
5,3	20	20	15	10
5,2	20	20	17	11
5,1	20	20	19	13
5,0	20	20	20	15
4,9	20	20	20	16
4,8	20	20	20	18
4,7	20	20	20	20
4,6	20	20	20	20

* Le chaulage jusqu'à un pH de 7,0 n'est recommandé que pour la maîtrise de la hernie dans les cultures de choux maraîchers.

Qualité de la chaux agricole

On utilise normalement deux paramètres pour évaluer la qualité de la chaux agricole, à savoir la valeur neutralisante et l'indice granulométrique.

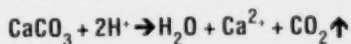
Valeur neutralisante

L'acidité est neutralisée lorsque les ions hydrogène (H^+) réagissent avec d'autres composés pour former de l'eau (H_2O).

Certains composés qui entrent dans les catégories générales des carbonates, des hydroxydes et des oxydes servent habituellement à neutraliser l'acidité.

Les carbonates sont les plus couramment utilisés à des fins agricoles parce qu'ils sont immédiatement disponibles dans les roches calcaires sédimentaires qu'on retrouve dans nombre de régions de la province et qu'ils sont relativement peu coûteux.

Lorsqu'on utilise du calcaire broyé, ce sont les carbonates dans le calcaire qui neutralisent l'acidité. Voici une réaction décrivant la façon dont le carbonate de calcium réagit avec deux ions hydrogène pour donner de l'eau et du dioxyde de carbone (CO_2). La flèche ascendante indique qu'il y a dégagement de gaz, du dioxyde de carbone, ce qui empêche jusqu'à un certain point la réaction de s'inverser.



Cette réaction est essentiellement la même que lorsque le vinaigre, acide libérant des ions hydrogène, est ajouté à du soda à pâte (bicarbonate de sodium).

Les hydroxydes (OH^-) se lient directement aux ions hydrogène (H^+) pour former de l'eau (H_2O). Les oxydes de calcium, de magnésium et de potassium peuvent se combiner à l'eau et former des hydroxydes. Les matériaux qui peuvent éventuellement servir d'amendements calcaires et qui renferment des oxydes et des hydroxydes sont normalement le résultat d'un traitement thermique ou de la combustion, par exemple les cendres de bois. Ils ont habituellement un pH élevé et sont plus caustiques à manipuler que le calcaire.

La valeur neutralisante représente la capacité du matériau de neutraliser l'acidité comparative-ment à la capacité du carbonate de calcium pur de faire le même travail. Puisqu'il s'agit d'une valeur relative, elle est exprimée en pourcentage de la capacité du carbonate de calcium ($CaCO_3$) de neutraliser l'acidité. Le carbonate de magnésium pur a un pouvoir neutralisant supérieur à celui du carbonate de calcium parce que les atomes de magnésium sont plus légers que les atomes de calcium. Toutefois, une molécule de carbonate de magnésium neutralisera autant d'acidité qu'une molécule de carbonate de calcium.

On n'utilise jamais de composés purs pour le chaulage, car ils sont trop coûteux. Habituellement, on utilise une source, comme du calcaire broyé, qui renferme une concentration relativement importante d'au moins un de ces composés.

TABLEAU 4-2. Valeur neutralisante de certains amendements calcaires

	Formule	Valeur neutralisante par rapport au carbonate de calcium
Chaux calcitique (carbonate de calcium)	CaCO_3	100
Carbonate de magnésium	MgCO_3	119
Chaux dolomitique (carbonates de calcium et de magnésium)	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	109
Hydroxyde de calcium	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	135
Oxyde de calcium	CaO	179
Hydroxyde de magnésium	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	172
Oxyde de magnésium	MgO	250
Hydroxyde de potassium	KOH	90
Gypse (sulfate de calcium)	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0
Cendres de bois	s.o.	40-80

Le pH du matériau en suspension dans l'eau n'est pas un bon indice de la capacité neutralisante d'un matériau. À titre d'exemple, le pH d'un hydroxyde de potassium peut être supérieur à 13 (basique et caustique). Même si le pH d'une solution de carbonate de calcium peut n'être que de 8,2, le carbonate de calcium constitue un agent de chaulage plus efficace.

Le calcaire est une roche sédimentaire formée par les coraux dans les mers chaudes. La roche calcaire n'est pas un minéral de carbonate pur. Le limon, l'argile, le sable et d'autres matériaux se sont également accumulés dans le fond des océans. La mesure de la présence de ces contaminants influe sur la pureté du calcaire et, par conséquent, sur sa valeur neutralisante.

Indice granulométrique

Pour être efficace, l'amendement calcaire doit se dissoudre. Le calcaire ne se dissout pas rapidement, contrairement au sel ou au sucre, et sa vitesse de dissolution diminue avec l'augmentation du pH. Il est indispensable de maximiser l'aire superficielle du calcaire si l'on veut obtenir des vitesses de dissolution satisfaisantes. On y parvient en réduisant de beaucoup la taille des particules.

L'indice granulométrique des amendements calcaires se mesure à l'aide de tamis. Le numéro du tamis correspond au nombre de mailles qui se trouvent sur une distance d'un pouce à partir du milieu d'un fil. Un tamis n° 10 compte 10 mailles au pouce, pour une ouverture de maille de 1,65 mm de côté. Voir le tableau 4-3.

Tout matériau passant à travers un tamis n° 60 est considéré comme efficace à 100 %. Les matériaux pas-

TABLEAU 4-3. Tamis utilisés pour déterminer l'indice granulométrique de la chaux

Número de tamis	N ^{bre} de mailles au pouce	Ouverture de maille (mm de côté)
10	10	1,65
60	60	0,25
100	100	0,15

TABLEAU 4-4. Détermination de l'indice granulométrique du calcaire

Dans cet exemple, 75 % de l'échantillon a traversé un tamis n° 10 et 40 %, un tamis n° 60.

Taille des particules	% de l'échantillon		Facteur d'efficacité		
Plus grossière que n° 10	25	×	0,0	=	0
Entre n° 10 et n° 60	35	×	0,4	=	14
Plus fine que n° 60	40	×	1,0	=	40
Indice granulométrique					= 54

sant par un tamis n° 10 et non par un tamis n° 60 ne sont considérés efficaces qu'à 40 %. Les matériaux qui ne passent pas dans un tamis n° 10 sont considérés inefficaces. Le tableau 4-4 montre comment est calculé l'indice granulométrique du calcaire.

Conformément aux normes fédérales, les pourcentages des matériaux qui passent à travers des tamis n° 10 et n° 100 doivent figurer sur l'étiquette exigée sur les amendements calcaires. En Ontario, on utilise les tamis n° 10 et n° 60 pour déterminer la qualité de la chaux agricole. Au toucher, elle doit être comparable à une farine finement moulue.

Habituellement, il n'est pas rentable de broyer des matériaux jusqu'à l'obtention de l'indice granulométrique nécessaire pour une chaux agricole efficace. La quantité de chaux utilisée en Ontario ne dépas-

serait pas 100 000-300 000 tonnes par an. À titre de comparaison, les ventes au détail d'engrais en Ontario ont atteint un sommet en 1985, en s'établissant à 1 162 000 tonnes. Le calcaire est surtout broyé pour d'autres fins, notamment pour fabriquer des agrégats utilisés dans la construction ou l'obtention de castine destinée à la fusion. Pour ces usages, les très fines particules n'étant pas souhaitables, celles-ci sont éliminées par tamisage. Ce sous-produit peut être tamisé davantage pour obtenir de la chaux agricole.

Chaux dolomitique ou calcitique

Les amendements calcaires faits à partir de roche calcaire broyée sont généralement classés en deux catégories, la chaux calcitique et la chaux dolomitique, d'après leurs teneurs en calcium et en magnésium.

La calcite (carbonate de calcium pur) renferme 40 % de calcium. La dolomite pure renferme 21,7 % de calcium et 13,1 % de magnésium.

La distinction entre chaux calcitique et chaux dolomitique n'est pas toujours très nette. Toute chaux qui contient surtout du calcium et très peu de magnésium sera considérée comme de la chaux calcitique. D'après un sondage mené en 2006, il y aurait en Ontario huit sources de chaux dolomitique et huit sources de chaux calcitique (K. Reid, 2006).

Lorsque le chaulage est recommandé, on doit utiliser de la chaux dolomitique sur les sols dans lesquels le dosage du magnésium est de 100 ou moins. Lorsque le dosage du magnésium donne une valeur supérieure à 100, on peut utiliser de la chaux calcitique ou de la chaux dolomitique. Nombre de sols de l'Ontario contiennent beaucoup de calcium ou de magnésium ou des deux. Des valeurs élevées obtenues lors du dosage de ces éléments ne posent pas problème et ne doivent pas influencer sur le choix du type de chaux (calcitique ou dolomitique).

Quiconque vend des produits fertilisants servant de sources de calcium ou de magnésium doit fournir une garantie d'analyse. Les teneurs en calcium et en magnésium du matériau s'expriment en pourcentage de Ca et de Mg.

Eau de chaux

On obtient de l'eau de chaux (ou lait de chaux) en mélangeant de la chaux aérienne à un liquide. En général, la chaux aérienne utilisée est très finement broyée et mélangée

à de l'eau ou à un engrais liquide. Habituellement, l'eau de chaux renferme de 50 à 75 % d'amendement calcaire, de 0,5 à 5,0 % d'argile et une petite quantité d'un agent dispersant. Le reste est constitué d'eau ou d'engrais liquide.

L'eau de chaux est habituellement associée à un indice granulométrique de 100 (traverse un tamis n° 100). La chaux qui traverse un tamis n° 60 étant déjà considérée à 100 % efficace, il n'est pas plus efficace d'employer de la chaux plus finement broyée.

Il n'a pas été démontré que l'eau de chaux était plus efficace que la chaux ordinaire.

Chaux granulaire

Certaines entreprises moussent l'utilisation de la chaux granulaire. Ce matériau est constitué de chaux finement broyée formée en granulés d'une taille analogue à celle des granulés d'engrais. Cette présentation aplanit nombre des problèmes de manutention et d'épandage que pose la chaux ordinaire, car elle permet d'utiliser le matériel d'épandage normal.

Aucune étude ne démontre qu'une faible dose de chaux granulaire est aussi efficace que la pleine dose de chaux ordinaire.

Le choix de l'amendement calcaire doit reposer sur le coût, la disponibilité et l'indice agricole du produit.

Autres agents de chaulage

Voici un aperçu des nombreux sous-produits industriels qui peuvent servir d'amendements calcai-

res : cendres de bois, poussière de ciment, carbonate de chaux (écume)

issu de la transformation de la betterave sucrière, chaux de dépoussiéreur, scories et biosolides. On doit évaluer pour chacun sa capacité de neutraliser l'acidité, sa teneur en métaux, et parfois, sa teneur en composés organiques. Il faut obtenir un certificat d'autorisation du ministère de l'Environnement (MEO) avant de procéder à l'épandage de ces produits sur des terres agricoles. Les directives intitulées *Guidelines for the Utilization of Biosolids and Other Wastes on Agricultural Land*, qu'on peut se procurer auprès du MEO ou du ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales (MAAARO) précisent les critères pris en compte dans l'évaluation des produits.

La chaux agricole a un pH d'environ 8,2. Certains autres agents de chaulage, par exemple la cendre de bois, peuvent afficher des pH beaucoup plus élevés. Il faut redoubler de prudence lorsqu'on manipule des matériaux à pH élevé. Des dommages aux plantules sont à craindre si les semis se font peu après l'incorporation au sol d'un matériau à pH élevé.

FIGURE 4-3. Indice agricole

Indice agricole =	$\frac{\text{Valeur neutralisante} \times \text{indice granulométrique}}{100}$
--------------------------	--

Indice agricole

L'indice agricole est un indicateur de la qualité de la chaux; il combine la valeur neutralisante et l'indice granulométrique en une seule valeur. Voir la figure 4-3.

L'indice agricole peut servir à comparer la capacité des chaux agricoles à neutraliser l'acidité du sol. Plus l'indice agricole est élevé, plus la chaux est efficace, à poids égal.

L'indice agricole moyen des chaux vendues en Ontario se situe aux environs de 75. Les recommandations de chaulage fondées sur les analyses de sol reconnues en Ontario reposent sur l'hypothèse que la chaux utilisée a un indice agricole de 75.

Les indices agricoles des chaux qui ont été vendues en 2006 par dix-huit carrières ontariennes se situaient entre 36 et 102. La moyenne était de 74 (K. Reid, 2006).

Les recommandations de chaulage doivent être corrigées en fonction de l'indice agricole réel de la chaux utilisée. La figure 4-4 montre le calcul à faire.

FIGURE 4-4. Quantité de chaux à épandre

Q^{te} à épandre = q^{te} recommandée ×	$\frac{75}{\text{Indice agricole de la chaux utilisée}}$
--	--

Compte tenu du poids et du volume de la chaux, les frais de transport à la ferme représentent la plus grande partie des coûts liés à l'épandage de chaux agricole. Pour cette raison, la solution la plus économique consiste à faire affaire avec la carrière la plus proche. On calcule le coût à l'hectare en multipliant, pour chaque source de chaux, le coût de la chaux épandue par la quantité de chaux nécessaire par hectare. Cette méthode permet de comparer les coûts selon la source d'approvisionnement.

Chaulage

Épandage

Les épandeurs d'engrais classiques ne sont pas conçus pour le chaulage, de sorte que la chaux bloquera le dispositif d'épandage. Il est conseillé d'utiliser des épandeurs commerciaux conçus pour la chaux.

Vérifier le schéma de distribution en utilisant la même méthode que pour contrôler la distribution du fumier à l'aide d'un épandeur à fumier (disposer des feuilles de plastique de 1 m × 1 m, recueillir et peser la quantité de chaux épandue sur chaque feuille, puis comparer les quantités épandues sur la largeur de travail).

Étant donné que la chaux est une poudre fine, le vent influence le schéma de distribution. Il est conseillé de procéder à l'épandage par temps calme. L'opérateur doit se protéger des risques d'inhalation de la poussière. Souvent, la chaux peut

dériver sur de très grandes distances, même par vents modérés.

S'il faut stocker la chaux à la ferme avant l'épandage, la protéger des intempéries et du vent de même que de l'humidité, car si elle prend l'humidité, la chaux s'agglutinera en blocs inutilisables.

Incorporation

Puisque la chaux agricole ne se dissout pas rapidement, il faut la mélanger uniformément au sol pour qu'elle soit efficace. Les outils aratoires qui mélangent le sol, par exemple le pulvériseur à disques (pulvérisateur déporté), sont les meilleurs pour cette tâche.

Dans les sols soumis au semis direct, corriger le pH devient un défi. Si la totalité de la couche retournée (15 cm) est acide, la seule option pratique est de retourner le sol pour incorporer la chaux.

Cela ne signifie pas que le chaulage et le semis direct sont totalement incompatibles. Dans les champs où se pratique le semis direct et où l'on a épandu en surface des engrais azotés, il peut se développer une mince couche de sol acide. Prélever des échantillons de la couche supérieure de 5 cm pour vérifier le pH à la surface du sol. On peut neutraliser l'acidité dans cette zone par des épandages fréquents de faibles doses de chaux.

Nombre d'exploitants épandent et incorporent une fraction du total de la chaux recommandée sur plusieurs années. Ils veillent ainsi à ce que la chaux soit plus uniformément répartie et mélangée par le travail du sol. Il s'agit d'une excel-

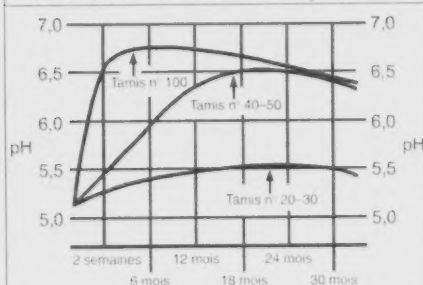
lente mesure préventive, mais qui ne saurait permettre de corriger une acidité grave.

Temps de réaction

La chaux agricole ne se dissout pas rapidement. La vitesse de dissolution dépend de la finesse de broyage des particules. Voir la figure 4-5. Par ailleurs, la vitesse de dissolution diminue à mesure que le pH du sol augmente et que le chaulage atteint son but. Une fois dissoute, la chaux doit se diffuser dans le sol et intervenir au niveau de l'acidité de la solution de sol et des sites d'échange cationique. Cette réaction mettra d'autant plus de temps à se produire que les sols seront secs ou gelés. Par conséquent, il faut du temps pour que le chaulage produise son plein effet. Il faut parfois compter jusqu'à trois ans.

Il est particulièrement important, dans les cultures sensibles à un pH faible, par exemple la luzerne, de procéder au chaulage bien avant les semis.

FIGURE 4-5. Temps de réaction de la chaux selon la finesse des particules



Que dire du gypse?

Le gypse n'est pas un amendement calcaire, même si on en vante largement la valeur comme source de calcium ou de soufre ou comme conditionneur de sol. Le gypse est utilisé comme conditionneur dans les sols sodiques, que l'on retrouve dans les Prairies, mais non en Ontario.

Le gypse, qui est constitué de sulfate de calcium, se décompose en ions calcium et en ions sulfate lorsqu'il se dissout dans l'eau du sol. Le calcium déplace l'hydrogène des sites d'échange cationique, mais se combine au sulfate pour former de l'acide sulfurique, de sorte qu'il n'y a aucun effet net sur le pH du sol.

On vante les mérites du gypse comme source de calcium parce qu'il est plus soluble que la chaux dans les sols alcalins. Même si cela est vrai, la solubilité demeure quand même faible (le gypse est le principal ingrédient du placoplâtre), de sorte qu'il en faudra de grandes quantités pour obtenir un apport appréciable de calcium. Il peut également constituer une bonne source de soufre là où le dosage de cet élément est faible.

Acidification du sol

Il arrive que des producteurs veuillent réduire le pH de leur sol. Cette opération s'impose dans la plupart des bleuetières commerciales de l'Ontario et dans les potagers devant servir à la culture du rhododendron ou de l'azalée. Ces plantes, qui prospèrent dans les sols affichant des pH entre 4 et 5, souffrent de carences en oligo-éléments dès que le pH du sol augmente au delà de ces niveaux.

Certains producteurs qui doivent composer avec des sols alcalins, c.-à-d. dont le pH est de 7 ou plus, peuvent avoir l'impression qu'en abaissant le pH, ils amélioreront la biodisponibilité des éléments nutritifs. Comme la plupart des cultures prospèrent dans des sols ayant un pH entre 6 et 8, il y a plus à craindre d'un pH faible que des carences consécutives à un pH élevé. Sans compter qu'il est beaucoup moins coûteux d'enrichir le sol d'éléments nutritifs que d'en abaisser le pH.

Réduction du pH du sol

On abaisse le pH du sol en augmentant le nombre d'ions hydrogène dans le sol, soit directement par des

apports d'acides ou par des apports de matières qui formeront des acides en réagissant avec le sol. Les engrais azotés qui renferment de l'ammonium acidifient le sol, tout comme le fer et le soufre élémentaires ou le sulfate d'aluminium. Le soufre oxydé est offert sous forme de sulfate d'aluminium ou de sulfate de fer (ferreux), mais ces substances doivent être ajoutées en quantités beaucoup plus considérables (quatre fois et huit fois respectivement) que le soufre élémentaire.

Pour des cultures comme le bleuet, qui bénéficient d'une forte concentration de matière organique, l'ajout de mousse de tourbe acide aura le double effet d'enrichir le sol de matière organique et de réduire le pH du sol. S'assurer que le pH de la mousse de tourbe est faible, car il en existe plusieurs marques qui augmentent le pH dans les mélanges d'empotage. Pour les grandes superficies, la mousse de tourbe est une solution trop coûteuse, que l'on réservera habituellement à la zone d'enracinement des plantes.

Pour obtenir des renseignements de base sur le pH du sol, il est conseillé de faire analyser le sol avant l'apport de soufre et trois mois

TABLEAU 4-5. Apports de soufre destinés à l'acidification du sol

Type de sol	kg/ha par unité de pH de 1,0 (lb/ac)	kg/ha par unité de pH de 0,1 (lb/ac)
sable	350 (313)	35 (31)
loam sableux	750 (670)	75 (67)
loam	1 100 (980)	110 (98)
Exemple : le pH initial d'un sol de loam sableux est de 6,2 et le pH cible pour le bleuet est de 4,8. Il faut réduire le pH du sol de 6,2 à 4,8, soit de 1,4 unité. Par conséquent, il faut épandre $1,4 \times 750 = 1\,050$ kg de soufre/ha.		

après. Il est important de faire contrôler le pH annuellement au moyen d'une analyse de sol.

Sols pouvant être acidifiés

Le succès des tentatives d'acidification du sol dépend du pouvoir tampon du sol. De façon générale, il est plus facile de modifier un sol sableux à faible teneur en matière organique et à capacité d'échange réduite qu'un sol argileux à forte capacité d'échange. Dans les sols ayant un fort pouvoir tampon, la réduction du pH du sol peut être de courte durée. L'autre facteur qui influence l'acidification du sol est la quantité de chaux libre dans le sol. Les sols dont le pH est supérieur à 7 contiennent souvent des carbonates de calcium et de magnésium non dissous, qui réagissent immédiatement avec l'acide généré par le soufre, ce qui le neutralise et empêche le pH de baisser.

Le pH naturel du sol a également un effet sur la facilité de réduction du pH. Ne pas oublier que l'échelle de pH est logarithmique. Passer de 7 à 5 est dix fois plus difficile que de passer de 6 à 5. Les sols dont le pH naturel est de deux unités supérieur au pH cible sont presque impossibles à modifier. Par exemple, s'il faut 750 kg de soufre/ha pour abaisser le pH du sol de 6 à 5, il en faudrait facilement 8000 kg/ha ou plus pour abaisser le pH de 7 à 5, en plus d'une quantité suffisante de soufre pour neutraliser toute la chaux libre qui se trouve dans le sol lorsque le pH est plus élevé. Pour le jardinier amateur, une meilleure solution consiste à remplacer le sol par un sol

acide ou à construire un lit surélevé de mousse de tourbe acide.

Il existe souvent, dans les champs, des zones qui résistent davantage aux tentatives de réduction du pH. Les symptômes de carence nutritive (p. ex. carence en azote dans les cultures de bleuet) sont de bons indices des zones qui ont besoin d'un traitement particulier. Faire analyser et traiter ces zones séparément.

Utilisation du soufre

Le moyen le plus économique, quoique tout de même coûteux, d'abaisser le pH du sol est d'épandre du soufre (S). Le soufre s'accompagne d'un processus biologique dans lequel les bactéries du sol convertissent le soufre élémentaire en sulfate de soufre. Le processus donne lieu à la production d'acide. Voici les inconvénients que présente l'utilisation du soufre :

- Il faut que le sol renferme une population viable des bonnes bactéries.
- Le processus est lent à s'accomplir lorsque la température du sol et les conditions d'humidité sont propices à l'activité microbienne. Il faut de trois mois à un an pour que la réaction soit complète.
- Il faut, dans nombre de sols, répéter l'épandage de soufre chaque année, pour maintenir un pH faible.

On trouve au tableau 4-5 les lignes directrices visant les épandages de soufre nécessaires pour abaisser le pH. Quand on épand du

TABLEAU 4-6. Efficacité relative des réducteurs de pH du sol

Produit	Formule chimique	Teneur en soufre (%)	Quantité nécessaire pour neutraliser 100 kg de carbonate de calcium* (kg)
Soufre élémentaire	S	100	32
Soufre granulaire	S	90	36
Acide sulfurique	H ₂ SO ₄	32	98
Sulfate de fer	FeSO ₄ •7H ₂ O	11,5	278
Sulfate d'aluminium	Al ₂ (SO ₄) ₃	14,4	114
Sulfate d'ammonium	(NH ₄) ₂ SO ₄	23,7	66

* Valeurs théoriques fondées sur la production d'acide consécutive à la réaction du produit avec le sol. S'attendre à une efficacité réelle réduite, parfois de moitié, les produits étant immobilisés à la surface du sol ou dans les microbes du sol, ou prélevés par les cultures.

soufre pour abaisser le pH d'un sol, il faut le faire avant l'établissement de la culture et incorporer le soufre au sol. Le soufre pulvérulent agit plus rapidement que le soufre granulaire, mais il est également plus coûteux et désagréable à épandre.

Le soufre peut être épandu en toutes saisons.

Le tableau 4-6 propose des solutions de rechange à l'épandage de soufre élémentaire et précise les équivalences entre les produits offerts.

Bibliographie

- Fixen, P.E., 1989. *Agronomic evaluations of MAP and DAP*. Compte rendu du congrès North Central Extension-Industry Soil Fertility Conference tenu en 1989 à St. Louis, MO. Potash & Phosphate Institute, Norcross, GA.
- Foth, Henry D. et Boyd G. Ellis, 1997. *Soil Fertility, Second Edition*. CRC Press, Inc. Boca Raton, FL 33431.
- Miller, M.H., C.P. Mamaril et C.J. Blair, 1970. *Ammonium effects on phosphorus absorption through pH changes and phosphorus precipitation at the soil-root interface*. Agron. J. 62:524-527.
- OMAFRA/MAAARO et MOE /MEO, 1996. *Guidelines for the Utilization of Biosolids and Other Wastes on Agricultural Land*.
- Reid, Keith, 2006. *Sources of Agricultural Limestone for 2006*. Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs / Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (www.ontario.ca/cultures).

5 SOURCES ORGANIQUES D'ÉLÉMENTS NUTRITIFS : FUMIER, BIOSOLIDES, LÉGUMINEUSES

Les sources organiques d'éléments nutritifs sont des matières qui renferment du carbone et qui ont déjà fait partie d'un organisme vivant. Les principales sources organiques d'éléments nutritifs sur les fermes de l'Ontario sont le fumier d'élevage et les résidus de cultures comme celles des légumineuses fourragères. Il y a aussi les matières qui proviennent de sources municipales ou industrielles, collectivement appelées biosolides, qui se prêtent à des épandages sur les terres. Quant aux engrais à base d'urée, bien que leur structure chimique renferme du carbone, ce sont des produits de fabrication qui ne sont normalement pas considérés comme étant des éléments nutritifs de source organique.

À des fins de gestion, on divise les sources organiques d'éléments nutritifs en deux groupes, selon qu'il s'agit de matières à épandre ou de résidus de cultures. Les matières d'épandage, comme le fumier, les biosolides et le compost, peuvent être appliquées à des doses, à des moments et à des endroits différents, de manière à répondre aux besoins nutritifs d'une culture en particulier. Par comparaison, l'utilisation des résidus de culture se limite aux champs où les cultures ont poussé. Même si tout type de résidu de culture influencera le cycle des éléments nutritifs dans le sol, ce sont les résidus de légumineuses

fourragères qui fournissent la plus grande quantité d'éléments nutritifs à la culture suivante. On peut aussi se servir de cultures de couverture pour prélever les éléments nutritifs excédentaires et en faire profiter la culture suivante.

Organiques, mais pas uniquement pour l'agriculture biologique

Même si l'agriculture biologique a recours à des sources organiques d'éléments nutritifs, ces sources conviennent tout aussi bien à des systèmes de culture traditionnels. Quel que soit le système, la clé est de gérer la matière organique de manière à fournir aux cultures des éléments nutritifs sous une forme biodisponible tout en évitant les apports excessifs. La différence tient au fait qu'avec les systèmes traditionnels, le producteur a la possibilité de compenser le manque de matières de source organique par des engrais chimiques. Les producteurs biologiques peuvent recourir à l'occasion à des apports supplémentaires, mais le choix des produits autorisés est plus restreint.

Éléments nutritifs tirés des matières d'épandage

Similitudes entre les matières

Il existe une vaste gamme de matières de source organique qu'on peut utiliser comme sources d'éléments nutritifs, certaines ayant des caractéristiques communes. Elles contiennent toutes un mélange d'éléments nutritifs de sources minérales et de sources organiques, en proportions variables selon la litière employée, le taux de dilution, le mode de stockage de la matière ou les traitements subis.

Les éléments nutritifs de source minérale présents dans la matière organique sont des produits chimiques identiques aux éléments nutritifs qu'on trouve dans les engrais chimiques et se présentent sous des formes immédiatement assimilables par les cultures. Sous ces formes, toutefois, les éléments nutritifs se perdent plus facilement dans l'environnement que les mêmes éléments nutritifs qui se lient à un composé organique. Dans le fumier, par exemple, l'azote est fractionné en composés organiques et en azote ammoniacal. L'azote ammoniacal est le même composé chimique que l'ammoniaque (liquide) ou que le gaz ammoniac qui se serait dissous dans l'eau du sol. L'azote ammoniacal est immédiatement assimilable par les végétaux, mais à l'instar de l'ammoniaque, si ce produit reste à la surface du sol, il s'évaporerait dans

l'air et s'échapperait sous forme de gaz ammoniac. Ainsi l'azote biodisponible provenant du fumier se trouve considérablement réduit si le fumier n'est pas incorporé au sol. Le tableau 5-1 montre la proportion d'azote ammoniacal présent dans différentes matières de source organique.

**TABLEAU 5-1. Proportion
de l'azote ammoniacal par
rapport à l'azote total***

(valeurs types exprimées en % de l'azote total épandu)

Matière	N ammoniacal
Fumier liquide de porcs	66 %
Fumier liquide de bovins laitiers	42 %
Fumier liquide de bovins de boucherie	43 %
Fumier liquide de volaille	67 %
Fumier solide de porcs	26 %
Fumier solide de bovins laitiers	21 %
Fumier solide de bovins de boucherie sur litière épaisse	12 %
Fumier solide de chevaux	15 %
Fumier solide de poulets à griller	6 %
Fumier solide de pondeuses	46 %
Fumier de bovins composté	0,6 %
Biosolides d'égouts municipaux :	
traitement aérobie	1,6 %
traitement anaérobie	35 %
déshydratation	12 %
stabilisation à la chaux	traces
Biosolides de papeterie	traces
Compost de déchets de champignons	5 %

* La teneur en azote ammoniacal augmente au fur et à mesure que la concentration de liquide dans la matière augmente.

Les composés organiques sont moins sujets aux pertes. Par contre, ils ne sont pas assimilables par les plantes avant d'être minéralisés (dégradés sous formes minérales) par des bactéries et autres organismes terricoles ou par une réduction chimique. La vitesse à laquelle se produit la minéralisation dépend de la facilité ou de la difficulté avec laquelle les composés organiques se dégradent, des conditions de sol (température, humidité, aération, pH, etc.) et du contact physique entre la matière et le sol.

Que la matière soit d'origine humaine ou animale importe moins que la façon dont la matière est gérée. Toutes les matières subissent des transformations chimiques et biologiques dans le sol.

Différences entre les matières

La différence fondamentale entre les différents types de fumier et entre le fumier et les biosolides tient à la quantité et au type de produit de dilution ajouté et au traitement que subit le mélange de matières avant son épandage. Sur la plupart des fermes d'élevage, l'urine et les fèces sont mélangés avec soit de la litière pour former du fumier solide, soit de l'eau pour former du fumier liquide. La totalité du produit résultant est normalement épandu sur les terres. Les biosolides d'égouts municipaux, par ailleurs, sont fortement dilués lorsqu'ils arrivent à l'établis-

sement de traitement. Le but du traitement des eaux usées est d'extraire et de nettoyer le gros de l'eau avant son rejet dans l'environnement et de récupérer le sous-produit de ce traitement pour le destiner à l'épandage.

La forme du fumier et sa teneur en éléments nutritifs varie d'une ferme à l'autre. On ne sert pas le même type de ration aux différentes espèces animales; on sert en général des rations riches en fourrages aux ruminants et des rations plus concentrées aux monogastriques (comme les porcs ou la volaille). Cela signifie que le fumier de ruminant renferme davantage de fibres et de plus faibles concentrations d'éléments nutritifs que la plupart des fumiers de porcs ou de volaille. Comme les rations destinées aux jeunes animaux sont normalement plus riches en protéines et en minéraux que les aliments destinés aux animaux à maturité, le fumier de jeunes animaux renferme de plus fortes concentrations d'éléments nutritifs. Tout changement apporté à la ration, comme l'ajout de phytase ou l'équilibrage des acides aminés dans le but de réduire les besoins en protéines, aura des conséquences palpables sur les concentrations d'éléments nutritifs dans les excréments des animaux. Le tableau 5-2 indique les concentrations moyennes d'éléments nutritifs dans différents types de fumier.

Façons de réduire la teneur en éléments nutritifs du fumier

1. Équilibrer correctement la ration. L'excédent d'éléments nutritifs sur les besoins des animaux sera simplement excrété. L'alimentation multiphase et l'alimentation selon le sexe de l'animal permettent de régler les rations en fonction des besoins précis des animaux à différentes phases de production.
2. Réduire au minimum le gaspillage d'aliments. Inspecter, régler et nettoyer périodiquement les distributeurs d'aliments et opter pour les modèles de distributeurs qui réduisent au minimum le gaspillage.
3. Ajouter de la phytase aux rations destinées aux porcs ou à la volaille, afin qu'ils digèrent le gros du phosphore contenu dans les céréales qui, autrement, ne serait pas assimilable, et afin de réduire les apports de phosphore nécessaires.
4. Équilibrer les acides aminés dans la ration afin que les besoins des animaux soient comblés sans un apport excessif de protéines. Cette mesure abaisse les concentrations d'azote dans le fumier.

Le système de manutention et de transfert du fumier dans le bâtiment d'élevage mélange le fumier avec différentes matières. Dans les systèmes sur fumier solide, il s'agit de la paille ou des copeaux de bois utilisés comme litière, tandis que dans les systèmes sur fumier liquide, il s'agit de l'eau qui s'écoule des abreuvoirs ou des eaux de lavage. La quantité des matières ajoutées au fumier varie considérablement d'un système à l'autre. Les tableaux 5-3 et 5-4 présentent les concentrations habituelles d'éléments nutritifs biodisponibles en fonction des différents types de fumier.

Certains fumiers sont par ailleurs soumis à des traitements qui visent à les rendre moins malodorants, à détruire les graines de mauvaises herbes ou à produire de l'énergie. Le compostage est un procédé aérobie qui a pour effet de transformer le gros de l'azote en des composés organiques complexes et à laisser

l'azote minéral restant essentiellement sous forme d'azote des nitrates. La digestion anaérobie est un procédé qui convertit une partie des composés organiques contenus dans le fumier en gaz méthane destiné au chauffage ou à la production d'électricité, et qui laisse le gros de l'azote sous forme d'azote ammoniacal.

Les biosolides d'épuration arrivent à l'usine de traitement des eaux usées sous une forme extrêmement diluée, étant donné que l'eau sert de support à leur évacuation vers l'usine. Avant l'avènement des certificats d'autorisation exigés pour l'épandage de biosolides sur les terres, il arrivait que ces matières renferment des quantités importantes de contaminants lorsque le réseau servait aussi à l'évacuation d'eaux usées de sources industrielles et domestiques. Les règlements adoptés par la plupart des administrations publiques restreignent

aujourd'hui la quantité de ces contaminants à des concentrations très faibles, de sorte que les biosolides qui sortent des usines de traitement respectent les critères énoncés dans le certificat d'autorisation. Le procédé de traitement provoque la concentration des solides et la précipitation hors de l'eau des phosphates sous des formes insolubles, tandis que le gros du potassium demeure en solution et n'est pas conservé. À la fin du procédé, les biosolides renferment à la fois de l'azote organique et de l'azote ammoniacal en plus d'une quantité appréciable de phosphore. La biodisponibilité de ce phosphore pour les végétaux peut varier selon le procédé de traitement utilisé. Ces biosolides peuvent être soumis à d'autres traitements avant leur épandage. Ces traitements supplémentaires peuvent modifier considérablement la quantité et la biodisponibilité des éléments nutritifs qu'ils contiennent.

D'autres matières de sources industrielles ou municipales peuvent se prêter à des épandages sur des terres. Ces matières peuvent varier considérablement selon la

source de la matière et le traitement qu'elle subit. Les biosolides de papeterie renferment surtout des composés carbonés, auxquels s'ajoutent des concentrations relativement faibles d'éléments nutritifs. Les composts de résidus de jardin renferment des quantités très variables d'azote, de phosphore et de potassium, selon la provenance de la matière. Il faut évaluer ces matières au cas par cas si elles doivent servir de source d'éléments nutritifs. Le tableau 5-5 donne la valeur nutritive type de certaines matières de source non agricole.

Les différents types de fumier et les différents biosolides ont des caractéristiques physiques et chimiques qui se recoupent. Cela signifie qu'il faut gérer de la même manière les éléments nutritifs contenus dans ces matières et que la méthode de gestion dépendra davantage des caractéristiques inhérentes à la matière qu'à sa provenance. Toutefois, les biosolides sont soumis à des règles supplémentaires qui visent à garantir que leur épandage soit fait de manière à profiter aux cultures.

Teneur en éléments nutritifs de matières de source organique

TABEAU 5-2. Teneurs moyennes en éléments nutritifs des fumiers d'élevage

Type de fumier	N ^{bre} d'échantillons)	Matière sèche %	N total ¹	NH ₄ -N	P ²	K	Ca	Mg	S	Zn	Cu	Mn
			Poids frais									
			%	%	%	%	%	%	%	ppm	ppm	ppm
Porcs	liquide (924)	3,8	0,40	0,265	0,13	0,17	0,12	0,06	0,06	85	30	22
	solide (54)	29,8	0,90	0,258	0,47	0,56	–	–	0,14	172	103	–
Volaille	liquide (137)	10,6	0,83	0,558	0,3	0,3	1,6	0,08	0,08	70	11	64
	solide (623)	52,6	2,37	0,550	1,11	1,17	4,6	0,28	0,16	238	33	204
Bovins laitiers	liquide (860)	8,5	0,36	0,153	0,09	0,24	0,49	0,14	0,04	48	17	40
	solide (150)	24,2	0,61	0,128	0,17	0,50	1,54	0,36	0,08	95	29	107
Bovins de boucherie	liquide (81)	7,95	0,52	0,179	0,13	0,43	0,7	0,3	0,04	57	14	61
	solide (176)	28,6	0,73	0,101	0,23	0,57	1,5	0,41	0,09	129	36	112
Moutons	solide (54)	31,3	0,76	0,186	0,27	0,70	1,5	0,38	n.d. ³	170	20	140
Chevaux	solide (32)	33,41	0,42	0,068	0,13	0,36	1,7	0,56	n.d. ³	73	23	113

Données tirées des analyses de fumier faites par des laboratoires ontariens entre 1992 et 2004. Les données sur les oligo-éléments proviennent d'un sous-ensemble de données plus petit. Les concentrations d'oligo-éléments sont étroitement liées à l'alimentation des animaux, d'où des variations importantes d'une ferme à l'autre.

¹ N total = N ammoniacal + N organique ² % de P = phosphore total

³ n.d. = donnée non disponible

**TABLEAU 5-3. Quantités moyennes d'éléments nutritifs
biodisponibles dans le fumier liquide
(TEL QU'ÉPANDU)**

	Teneur moyenne en matière sèche	Azote assimilable				P ₂ O ₅ assimilable	K ₂ O assimilable
		Fin d'été*	Fin d'automne*	Printemps, sans incorporation	Printemps, avec injection		
	%	lb/1000 gal					
Fumier liquide de porcs							
6-10 %	7,5	15	30	24	43	22	27
2-6 %	3,5	9,4	20	16	30	12	20
0-2 %	1,3	5,3	11	9,6	18	4,6	13
Moyenne	3,8	9,2	19	16	29	12	18
Fumier liquide de bovins laitiers							
10-18 %	13,6	14	20	15	24	13	35
6-10 %	8,1	10	15	12	20	7	26
2-6 %	4,5	7,3	10	8,7	15	6,4	21
0-2 %	1,0	2,9	4,1	3,8	6,8	4,6	13
Moyenne	8,5	10	15	12	19	8,3	26
Fumier liquide de bovins de boucherie							
Moyenne	7,1	9	13	10	17	7	22
Fumier liquide de volaille							
10-18 %	13,8	25	49	41	72	35	37
6-10 %	8,2	21	41	35	63	25	31
2-6 %	4,4	13	26	23	42	11	24
Moyenne	10,6	22	42	36	64	28	32
Eaux de ruissellement							
Moyenne	0,6	1,2	2,5	2,0	3,6	1,5	9,6

* Incorporation du fumier dans les 24 heures qui suivent son épandage.

On évalue le phosphate assimilable à 40 % de la teneur du fumier en phosphate total. On évalue le K₂O assimilable à 90 % du K₂O total.

Pour convertir des livres par 1000 gallons en kilogrammes/mètre cube, multiplier par 10.

Données tirées d'analyses de fumier effectuées par l'Université de Guelph, Stratford Agri-Analysis, A&L Canada Labs et Agrifood Labs entre 1991 et 2003.

**TABLEAU 5-4. Quantités moyennes d'éléments
nutritifs assimilables dans le fumier solide
(TEL QU'ÉPANDU)**

	Teneur moyenne en matière sèche	Azote assimilable				P ₂ O ₅ assimilable	K ₂ O assimilable
		Fin d'été	Fin d'automne	Printemps, sans incorporation	Printemps, incorporation immédiate		
	%	kg/t (lb/t imp.), poids frais					
Fumier de porcs	28,2	2,3 (6,1)	2,3 (6,1)	2,6 (5,6)	3,6 (7,9)	5,5 (12)	7,7 (17)
Fumier de bovins laitiers	24,2	1,5 (3,3)	1,7 (3,7)	1,2 (2,7)	1,8 (4,0)	1,3 (2,9)	5,0 (11)
Fumier de bovins de boucherie	28,6	1,8 (3,9)	2,0 (4,4)	1,3 (2,8)	1,6 (3,6)	1,3 (2,9)	6,4 (14)
Fumier de poulets à griller	60	7,8 (17)	7,3 (16)	7,8 (17)	10,0 (22)	8,2 (18)	11,8 (26)

On évalue le phosphate assimilable à 40 % de la teneur du fumier en phosphate total. On évalue le K₂O assimilable à 90 % du K₂O total.

Données tirées d'analyses de fumier effectuées par l'Université de Guelph, Stratford Agri-Analysis,
A&L Canada Labs et Agrifood Labs entre 1991 et 2003.

TABLEAU 5-5. Teneur en éléments nutritifs des biosolides
(POIDS SEC)

Matière	Teneur moyenne en matière sèche	Azote total	NH ₄ -N	N utilisable dans l'année d'épandage	P ₂ O ₅ assimilable	K ₂ O assimilable
	%	% de matière sèche				
Biosolides d'égouts municipaux						
aérobies	1,7	5,0	0,01–0,75	0,08	2,5	> 0,01
anaérobies	3,0	6,4	0,33–3,4	2,7	3,3	> 0,01
déshydratés	26	3,6	0,35–0,65	1,0	2,5	> 0,01
en granulés			traces	0,8	4,5	> 0,01
Biosolides de papeterie						
primaires	50	0,3	traces	0,1	traces	traces
primaires et secondaires	32,8	2,5		1,4	0,08	0,02
Drêches de distillerie						
séchées		5,0		1,5	0,6	0,9
Les matières de source non agricole ont une qualité et une teneur en éléments nutritifs qui leur sont propres et qui doivent être évaluées au cas par cas. Les producteurs sont tenus d'échantillonner et de faire analyser périodiquement les matières qu'ils produisent. Cette information doit servir à déterminer les taux d'application qui répondront avec précision aux besoins des cultures.						

TABLEAU 5-6. Teneur en éléments nutritifs de certains composts
(POIDS SEC)

Matière	Teneur moyenne en matière sèche	Azote total	NH ₄ -N	N utilisable dans l'année d'épandage	P ₂ O ₅ assimilable	K ₂ O assimilable
	%	% de matière sèche				
Fumier de bovins composté	38,3	2,25	0,14	0,67	0,68	3,1
Compost de déchets de champignons	35	2,1	0,05	0,63	0,75	1,25

Facteurs influençant la biodisponibilité des éléments nutritifs

Azote

L'azote prélevé par les cultures est minéralisé; il se présente sous forme de nitrates (NO_3^-) ou d'ammonium (NH_4^+). Ainsi, la fraction d'azote ammoniacal présente dans le fumier est immédiatement assimilable par la culture, tandis que l'azote organique doit d'abord être minéralisé pour le devenir. Pour que les éléments nutritifs présents dans le fumier soient utilisés au mieux, il faut qu'ils soient disponibles à l'endroit et au moment où la culture peut les utiliser, un objectif qui n'est pas toujours facile et parfois même impossible à atteindre au moyen des méthodes de gestion du fumier actuelles.

Pour plus de détails sur le cycle de l'azote, se reporter au chapitre 3, p. 64.

Volatilisation de l'ammoniac

L'azote ammoniacal peut être facilement converti en gaz ammoniac quand le fumier est exposé à l'air, ce qui fait perdre au fumier une grande quantité de l'azote assimilable qu'il renferme. Les conditions qui favorisent une perte rapide de l'azote ammoniacal depuis la surface du sol sont les fortes concentrations d'ammonium dans le fumier, les températures élevées, les sols secs et du temps venteux. Le feuillage ou les résidus de culture ont des effets variables sur la volatilisation de l'ammoniac. Même s'ils peuvent réduire les pertes lorsque

le fumier est épandu sous la couverture végétale, le contraire peut aussi se produire, c.-à-d. que les pertes peuvent en fait être intensifiées lorsque le fumier est épandu au-dessus du feuillage, car la surface d'exposition est alors accrue. L'incorporation du fumier est un moyen efficace de stopper la volatilisation de l'ammoniac, étant donné que l'ammoniac libéré est rapidement absorbé dans l'eau du sol et adsorbé sur les surfaces des particules d'argile.

Minéralisation

L'azote organique contenu dans le fumier doit être converti en ammonium avant de pouvoir être assimilé par les végétaux. Cette conversion est réalisée par les microbes qui, en se nourrissant des composés organiques, rejettent de l'ammonium, qui est donc un sous-produit de leur alimentation. Par conséquent, la vitesse de minéralisation s'accroît lorsque les conditions sont favorables à l'activité microbienne. La nature de la matière organique contenue dans le fumier influence aussi la vitesse de minéralisation. Environ 20 % de l'azote organique provenant du fumier de ruminants serait biodisponible au cours de la première saison suivant l'épandage. Cette proportion irait jusqu'à 30 % dans le cas du fumier de volaille et se situerait à mi-chemin entre les deux dans le cas du fumier de porcs.

La minéralisation ralentit quand les conditions de sol sont fraîches. Ce ralentissement peut aller jusqu'à provoquer des carences temporaires en azote les printemps frais, dans les cultures semées dans des

Ratio carbone:azote (C:N)

Le ratio C:N représente l'équilibre entre les quantités de carbone et d'azote dans la matière organique. Le carbone est un constituant des composés organiques, comme la cellulose, la lignine et les protéines, qui sont des sources d'éléments nutritifs pour les micro-organismes du sol. Les micro-organismes ont besoin d'azote au fur et à mesure qu'ils se multiplient pour tirer parti de la réserve d'aliments accrue à leur disposition. Si la matière organique ne renferme pas suffisamment d'azote, ils absorberont l'azote du sol pour répondre à leurs besoins. Cet azote immobilisé sera par la suite rejeté une fois que le carbone excédentaire aura été utilisé et que la population microbienne commencera à diminuer. En principe, on assiste à la minéralisation lorsque le ratio C:N de la matière organique est inférieur à 20, et à l'immobilisation de l'azote quand le ratio est supérieur à 30. Par ailleurs, l'équilibre entre minéralisation et immobilisation dépend des conditions de température et d'humidité ainsi que de la nature de la matière organique.

champs ayant reçu des épandages de fumier. Un engrais de démarrage à base d'azote peut prévenir cette situation.

Immobilisation

Les microbes peuvent immobiliser l'azote du sol pendant qu'ils assurent la dégradation des composés carbonés dans les matières riches en carbone qui ont été épandues sur le sol, comme le fumier à forte teneur en paille ou les biosolides primaires de papeterie. Voir l'encadré Ratio carbone:azote ci-dessus et le tableau 5-7. L'immobilisation peut réduire la biodisponibilité de l'azote pour les cultures si ces matières sont épandues avant l'ensemencement. Théoriquement, ces matières pourraient fixer l'azote du sol à l'automne et réduire ainsi les pertes par lessivage durant l'hiver, mais il reste à démontrer jusqu'à quel point.

TABLEAU 5-7. Ratios C:N types de certaines matières courantes

Micro-organismes du sol	7-9
Matière organique du sol	10-12
Luzerne	13
Seigle d'automne	
stade végétatif	14
floraison	20
maturité	80
Paille de céréales	80
Raffles de maïs	60
Bran de scie	200-400
Biosolides de papeterie	
primaires	80-100
secondaires	7-10
Drêches de distillerie	9
Fumier solide de bovins	20-30
Fumier solide de volaille	10
Fumier composté	10-40
Compost de résidus de jardin	25-40
Compost de déchets de champignons	25-30

Phosphore

Le gros du phosphore présent dans le fumier est associé à la fraction solide du fumier et se trouve sous forme d'orthophosphate (PO_4^{3-}) ou sous la forme de composés organiques facilement dégradés. Cela signifie que sur le plan chimique, le phosphore contenu dans le fumier n'est pas très différent du phosphore contenu dans les engrais. Malgré cela, on suppose que l'année de l'épandage, le phosphore tiré du fumier est moins facilement assimilable par les cultures que celui qui est tiré des engrais. En Ontario, on suppose que, l'année de l'épandage, la biodisponibilité du P tiré du fumier correspond à 40 % de celle du P tiré des engrais.

Des études récentes menées dans des serres montrent que, lorsque des quantités égales de phosphore provenant de fumier liquide de porcs et d'engrais sont mélangées uniformément au sol, l'une et l'autre donnent lieu à des prélèvements égaux par les cultures. La différence dans la biodisponibilité apparente du phosphore pourrait s'expliquer par la difficulté à disposer le fumier dans une bande à proximité de la semence en vue d'une biodisponibilité maximale et la difficulté à maintenir des taux d'application uniformes à la grandeur du champ.

En Ontario, dans les plans de gestion des éléments nutritifs, on considère que 80 % de la teneur du fumier en P total contribuent à la fertilité des sols. Ailleurs, ce pourcentage peut atteindre 100 %. Commander des analyses périodi-

ques du sol de chaque champ est le meilleur moyen de surveiller l'accumulation réelle de P dans le sol.

Souvent, au cours du processus de traitement secondaire, les biosolides municipaux subissent un traitement au sulfate d'aluminium (aussi connu sous le nom d'alun), au sulfate de fer ou à la chaux, qui vise à débarrasser l'effluent du phosphate. Certains éleveurs de volaille ont recours à un traitement semblable. Ce traitement fait en sorte qu'une grande proportion du P se fixe aux phosphates de calcium, de fer ou d'aluminium insolubles, ce qui peut réduire considérablement la biodisponibilité des éléments nutritifs contenus dans ces matières, à la fois à court terme et à long terme.

Potassium

Essentiellement, tout le potassium contenu dans le fumier se trouve sous des formes solubles qui sont assimilables par les cultures. Dans le cas du fumier solide, les pertes peuvent survenir au moment du stockage si les eaux de ruissellement ne sont pas recueillies. De forts taux d'application du fumier sur les fermes laitières peuvent donner lieu à des prélèvements considérables de K par la luzerne au point où celle-ci peut provoquer des déséquilibres des minéraux dans l'alimentation des vaches taries appartenant aux races laitières. Les biosolides d'épuration renferment très peu de potassium, celui-ci n'étant pas conservé par les matières sèches durant le traitement.

Les concentrations de phosphore et de potassium dans le fumier varient considérablement d'une exploitation à l'autre. Les analyses de laboratoire constituent le meilleur moyen de s'en faire une idée.

Éléments nutritifs secondaires et oligo-éléments

En plus du trio NPK et de la matière organique, le fumier renferme des quantités appréciables de calcium, de magnésium, de soufre et d'oligo-éléments. Les carences en ces éléments sont plutôt rares sur les fermes d'élevage qui font des épandages de fumier périodiques.

Les biosolides aussi contiennent des oligo-éléments, dont les concentrations dépendent souvent des sources (résidentielles, institutionnelles et industrielles) d'où proviennent les eaux usées qui affluent vers le réseau. Grâce aux règlements sur l'évacuation des eaux usées, les effluents industriels renferment souvent moins de contaminants que ceux d'autres sources.

Certains oligo-éléments (p. ex. zinc, cuivre) sont réglementés en vertu de la *Loi sur la protection de l'environnement*. Les concentrations de ces éléments sont limitées dans les biosolides et si le niveau de l'un ou l'autre de ces éléments est trop élevé, la matière ne peut être épandue sur des terres. En général, le fumier renferme peu de ces éléments, à moins que ceux-ci n'aient été ajoutés à la ration pour réduire l'utilisation d'antibiotiques, auquel cas, il se peut qu'il faille réduire le

taux d'application ou la fréquence d'épandage.

Prévision de la biodisponibilité des éléments nutritifs dans les matières épandues

Pour optimiser l'utilisation des éléments nutritifs dans la matière organique, il faut connaître la quantité de l'élément contenue dans la matière épandue et le pourcentage de biodisponibilité de cet élément. Étant donné que la plupart du temps, la réaction des cultures aux apports d'éléments nutritifs a été mesurée avec des engrais minéraux, la biodisponibilité des éléments nutritifs de sources organiques est souvent exprimée par rapport à celle des engrais.

Il existe des tables de biodisponibilité qui fournissent les valeurs nutritives moyennes pour différents types de fumier et de biosolides et qui constituent de bons outils de planification. Compte tenu de la variabilité entre les sources d'éléments nutritifs, toutefois, l'analyse de la matière à épandre fournit de l'information plus juste, dans la mesure où l'échantillon recueilli est représentatif.

Interprétation des résultats d'analyses de fumier

Les résultats des analyses de fumier doivent absolument être interprétés avec rigueur, car ils peuvent être exprimés de maintes façons, notamment en pourcentage de la matière sèche dans le fumier ou en pourcentage du poids frais (humide). De plus, les résultats peuvent avoir

été convertis en une valeur de remplacement des engrais, sur la foi de l'information fournie au moment du dépôt de l'échantillon.

Les formules utilisées pour calculer les coefficients de disponibilité du phosphore et du potassium sont présentées au tableau 5-8. Le tableau 5-9 montre comment convertir les coefficients de disponibilité en unités de poids d'utilisation courante.

Azote total, ammoniacal et organique

Dans la plupart des matières organiques, l'azote se présente sous forme d'azote ammoniacal et sous forme d'azote organique, de sorte que l'azote total s'entend de la somme des deux formes. Les laboratoires mesurent l'azote total et l'azote ammoniacal, la quantité d'azote organique étant déduite au moyen d'une soustraction.

Les matières compostées peuvent renfermer une quantité considérable d'azote des nitrates. Vérifier si le laboratoire effectue une analyse complète à l'égard de la biodisponibilité de l'azote, c.-à-d. azote des nitrates, azote ammoniacal, azote total et ratio C:N.

Les estimations de l'azote biodisponible dans le fumier peuvent s'exprimer en pourcentage de l'azote total, une méthode qui suppose que la gestion du fumier et des épandages est « moyenne ». Il s'agit d'un bon outil qui permet de planifier de façon générale la répartition du fumier entre les différents champs. Des évaluations plus précises de

TABLEAU 5-8. Calcul des coefficients de biodisponibilité du phosphore et du potassium dans le fumier

Pour la plupart, les laboratoires ontariens indiquent les quantités de P_2O_5 et de K_2O assimilables dans le fumier, mais il arrive que le résultat soit exprimé par un coefficient de disponibilité (% de P et de K). Il faut alors convertir les coefficients pour exprimer les résultats avec les unités utilisées dans les recommandations de fertilisation.

Conversion du P total en P_2O_5 assimilable

% de P $\times 2,29$ = % de P_2O_5 total

% de P_2O_5 total $\times 0,40$ = % de P_2O_5 assimilable l'année de l'épandage

% de P_2O_5 total $\times 0,80$ = % de P_2O_5 assimilable accumulé dans le sol

Conversion du K total en K_2O assimilable

% de K $\times 1,20$ = % de K_2O total

% de K_2O total $\times 0,90$ = % de K_2O assimilable

TABLEAU 5-9. Conversion du coefficient de biodisponibilité en unités de poids

Conversion du % d'éléments nutritifs assimilables en unités de poids

% d'éléments nutritifs assimilables $\times 10$ = kg/t

% d'éléments nutritifs assimilables $\times 20$ = lb/t imp.

% d'éléments nutritifs assimilables $\times 10$ = kg/1000 L (kg/m^3)

% d'éléments nutritifs assimilables $\times 100$ = lb/1000 gal imp.

l'azote biodisponible dans le fumier peuvent être faites après l'épandage une fois que les données sur le moment de l'application, les conditions météorologiques au moment de l'épandage, et le laps de temps écoulé avant l'incorporation sont connues. L'utilisation des quantités réelles d'azote ammoniacal et d'azote organique révélées par l'analyse du fumier peut aussi donner des estimations plus précises.

Effets du moment et de la méthode d'application

Le moment et la méthode d'application ont surtout une incidence sur la biodisponibilité de l'azote et beaucoup moins sur celles du

phosphore et du potassium. Comme l'azote minéral et l'azote organique sont présents en proportions variables dans la matière organique, les répercussions du moment et de la méthode d'application ne sont pas les mêmes pour toutes les matières.

La volatilisation de l'ammoniac donne lieu à une perte immédiate d'azote assimilable. L'importance de la perte varie en fonction du délai entre l'application et l'incorporation de même qu'en fonction des conditions au moment de l'application. Voir le tableau 5-10. L'azote ammoniacal conservé dans le sol est toujours sujet aux pertes à la suite de sa conversion en nitrates attribuable au lessivage ou à la

TABLEAU 5-10. Perte de l'azote ammoniacal contenu dans le fumier sous différentes conditions météorologiques et de sol

Intervention après l'épandage	Moyenne	Temps frais ($< 10^{\circ}\text{C}$)		Temps doux ($> 20^{\circ}\text{C}$)	
		Sol mouillé	Sol sec	Sol mouillé	Sol sec
Injection	0	0	0	0	0
Incorporation en moins de 1 journée	25	10	15	25	50
Incorporation en moins de 2 jours	30	13	19	31	57
Incorporation en moins de 3 jours	35	15	22	38	65
Incorporation en moins de 4 jours	40	17	26	44	73
Incorporation en moins de 5 jours	45	20	30	50	80
Absence d'incorporation					
Printemps, été, début d'automne					
– sol nu	66	40	50	75	90
– résidus de cultures	50	30	35	60	70
– culture sur pied	33	20	25	40	50
Fin d'automne (temp. de l'air $< 10^{\circ}\text{C}$)	25	25	25	s.o.	s.o.
Source : adaptation d'un tableau tiré du fascicule de la série « Pratiques de gestion optimales », intitulée <i>Gestion du fumier</i> , 2006.					

dénitrification. La matière organique riche en azote minéral est celle qui procure la plus grande quantité d'azote aux cultures pourvu qu'elle soit épandue le plus près possible du moment où l'azote peut être prélevé par les cultures.

L'azote organique ne devient assimilable par les cultures qu'une fois converti en azote ammoniacal par suite de sa minéralisation. Cette conversion est lente quand les sols sont froids. La différence observée entre les épandages de printemps et les épandages d'automne au niveau de la biodisponibilité de l'azote contenu dans des matières qui ferment surtout de l'azote organique (p. ex. le fumier solide de bovins de boucherie ou de bovins laitiers) est beaucoup moins grande, étant donné que la perte d'azote minéral est compensée par une biodisponibilité accrue de l'azote organique. Les épandages effectués au début du printemps et suivis d'une incorporation ont l'avantage d'optimiser la biodisponibilité de l'azote. Cette pratique assure la conservation de l'azote ammoniacal, mais laisse aussi le temps à la minéralisation de se produire. Épandre la même matière en fin d'automne peut procurer le même avantage, car le sol est alors suffisamment froid pour freiner la nitrification. Le risque, avec les épandages de fin de saison, est lié à la variabilité des conditions météorologiques automnales et hivernales.

Effets des systèmes de traitement tels que compostage ou digestion anaérobie

Les systèmes de traitement modifient la forme de l'azote dans la matière et peuvent également réduire considérablement la concentration d'azote dans celle-ci. L'échantillonnage et l'analyse sont très importants pour connaître la valeur de la matière traitée et décider de sa gestion.

Le compostage est un procédé aérobie qui vise à convertir le plus possible de l'azote contenu dans la matière en une forme organique. Il oblige à ajouter au fumier ou aux biosolides des matières affichant un ratio C:N élevé, puis à créer des conditions propices à la prolifération microbienne. Dans un système de compostage bien géré, les microbes prélèvent l'essentiel de l'azote pendant qu'ils se nourrissent de la matière riche en carbone. Si le compost est mal géré, jusqu'à la moitié de l'azote total peut être perdu par volatilisation. Au terme du compostage, ce n'est pas tout l'azote qui s'est lié à des composés organiques. Du fait des conditions aérobies, l'azote minéral qui subsiste se trouve essentiellement sous forme d'azote des nitrates. Quand le compost est épandu à la surface du sol, les pertes d'azote par volatilisation sont négligeables, mais la biodisponibilité de l'azote organique est intimement liée à la présence de conditions favorables à la minéralisation. Le tableau 5-6, p. 123, présente les teneurs types en éléments nutritifs de certains composts.

On a recours à la digestion anaérobie pour réduire les odeurs et la charge pathogène des matières organiques, et produire du méthane destiné au chauffage ou à la production d'électricité. Le produit fini a perdu passablement de sa matière organique facilement dégradable et renferme une plus grande concentration d'azote ammoniacal qu'au départ. Par conséquent, la digestion anaérobie augmente la biodisponibilité immédiate de l'azote contenu dans la matière, qui, par contre, devra être rapidement incorporée au sol. Les matières ainsi traitées perdent en effet généralement plus d'azote par volatilisation lors des épandages en surface que les matières qui n'auraient pas été soumises à ce type de digestion.

Prévision de la biodisponibilité de l'azote dans le fumier

Pour les besoins d'une planification sommaire, il est possible d'évaluer la biodisponibilité de l'azote présent dans les matières organiques en consultant des tables. Toutefois, pour déterminer avec précision les taux d'application des engrais, une évaluation plus précise est souhai-

table. Il s'agit alors de mesurer la concentration d'azote ammoniacal dans le fumier, les possibilités de minéralisation à partir de la réserve d'azote organique et les pertes prévisibles d'azote contenu dans le sol entre le moment de l'épandage de fumier et le prélèvement d'azote par les cultures. Les figures 5-1 à 5-4 font ressortir les apports relatifs d'azote ammoniacal et d'azote organique fournis par le fumier selon la méthode d'application et le moment de l'épandage. La quantité d'azote assimilable par les cultures est déterminée par la concentration initiale d'azote dans le fumier, par les transformations que subit cet azote et par les pertes d'azote. Les tableaux qui établissent des prévisions de la biodisponibilité de l'azote contenu dans le fumier cherchent donc à tenir compte de ces facteurs, sans toutefois parvenir à rendre compte de toute la variabilité de la gestion ou de l'influence du climat. L'incertitude des prévisions est plus grande dans le cas des épandages effectués à la fin de l'été ou à l'automne, que dans le cas des épandages effectués près du moment des semis.

FIGURE 5-1. Épandage de fumier solide à la surface du sol à l'automne

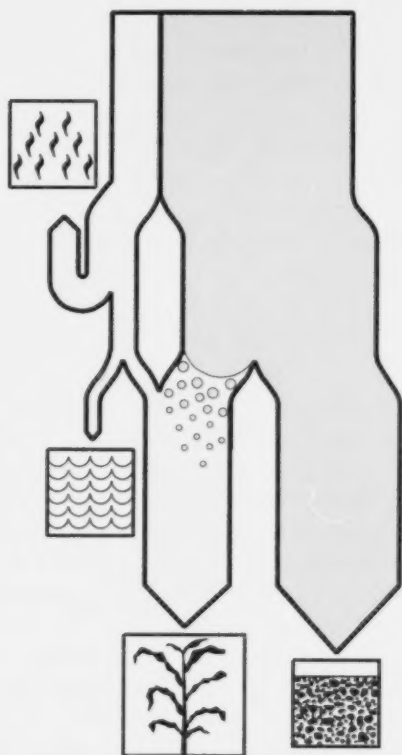
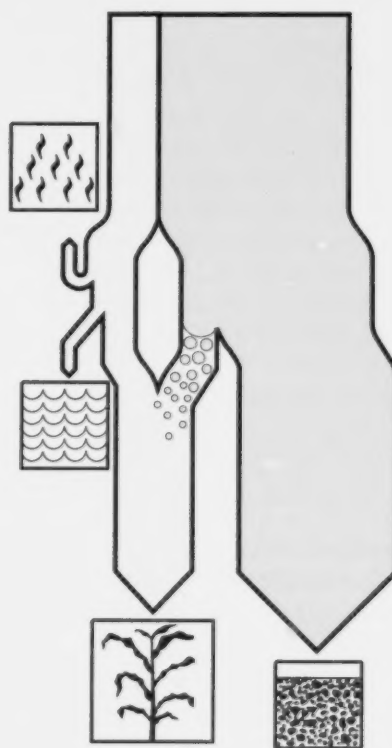


FIGURE 5-2. Épandage de fumier solide au printemps, avec incorporation dans la journée qui suit



LÉGENDE



N ammoniacal



N organique



N biodisponible

FIGURE 5-3. Épandage de fumier liquide à la surface du sol à l'automne

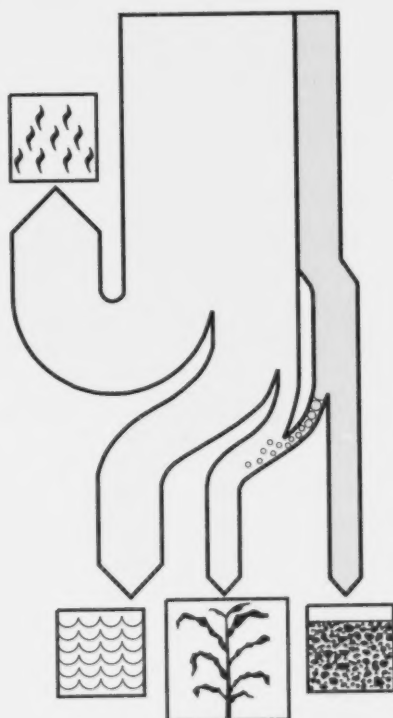
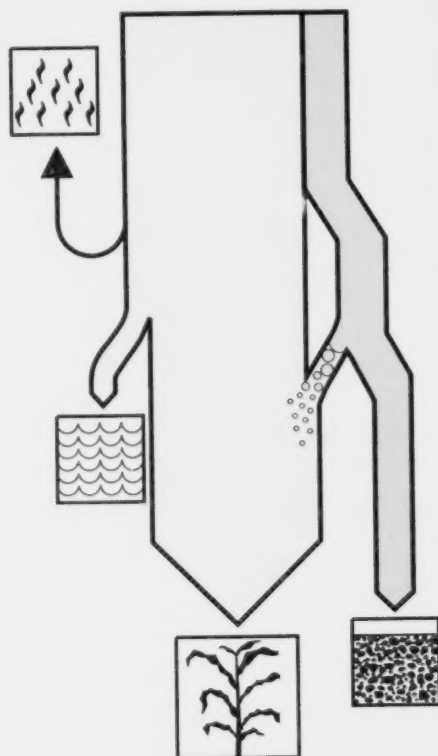


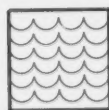
FIGURE 5-4. Épandage avec injection de fumier liquide au printemps



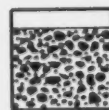
LÉGENDE



Volatilisation



**Lessivage ou
dénitrification**



**N organique
dans le sol**

L'azote contenu dans le fumier se présente dans des proportions variables, sous forme minérale et sous forme organique. Une partie de l'azote se perd dans l'air ou dans l'eau, une partie demeure sous forme organique, le reste étant assimilable par les cultures.

Azote assimilable provenant des épandages de fumier précédents

La plus grande partie de l'azote assimilable contenu dans le fumier est utilisée par la culture ou perdue pendant la première saison de croissance suivant l'épandage. Le reste de l'azote, l'azote organique, devient assimilable en quantités faibles et décroissantes les années suivantes. On considère généralement que l'azote provenant d'épandages est assimilable à 10 % après un an, à 5 % après deux ans et à 2 % après trois ans. Compte tenu de ces pourcentages, un seul épandage de fumier ne devrait pas influencer pour la peine les recommandations visant les apports d'azote. Toutefois, si un même champ fait l'objet d'épandages répétés de fumier solide, on peut s'attendre à une concentration importante d'azote résiduel.

Vérification de la dose appliquée par le matériel d'épandage

La vérification de la dose appliquée par le matériel d'épandage est primordiale. Plusieurs méthodes permettent de mesurer les taux d'épandage.

Pour les matières solides :

- Peser un chargement et mesurer la superficie qu'il recouvre.

OU

- Étendre un sac de plastique d'un mètre carré sur le sol et y épandre du fumier solide comme on le ferait dans un champ. Peser le sac et le fumier et repérer l'équivalence dans le tableau 5-12.

On ne peut se fier aux évaluations de la dose de fumier solide effectuées à partir du volume de l'épandeur en raison des variations dans la hauteur de réglage de l'appareil et dans la densité des divers types de fumier solide. Voir le tableau 5-11.

TABLEAU 5-11. Densités de fumier

	kg/m ³	lb/pi ³	lb/ boiss.
Liquide	1000	62,4	80
Semi-solide	960	60	76
Solide épais	800	50	64
Solide léger	560	35	45

Pour les matières liquides :

- Le taux d'application peut être déterminé en divisant le volume de la citerne par la superficie couverte par l'épandage du fumier d'une citerne. Cette superficie peut être calculée à l'aide de la largeur de travail, de la vitesse d'avancement de l'épandeur et du temps nécessaire pour vider la citerne.

OU

- Placer un seau à parois verticales sur le sol que l'on compte couvrir. Épandre le fumier, puis mesurer la profondeur du fumier dans le seau et repérer le taux d'épandage au tableau 5-12.

Prendre en considération les chevauchements.

TABLEAU 5-12. Vérification de la dose appliquée par les épandeurs			
Épandeurs de fumier solide			
feuille de 1 m x 1 m (40 po x 40 po)			
Poids/feuille		Dose	
kg	lb	t/ha	t imp./ac
0,5	1	3,6	1,6
1	2	7,2	3,2
1,5	3	10,8	4,8
2	4	14,3	6,4
2,5	5	17,9	8,0
3	7	25,1	11,2
5	10	35,8	16,0
7,5	15	53,8	24,0
Vérification de la dose de fumier liquide à l'aide d'un seau à parois verticales			
Profondeur de fumier		Dose	
mm	L/ha	po	gal/ac
2,5	25 000	1/10	2 265
3,1	31 000	1/8	2 825
6,3	63 000	1/4	5 650
9,4	94 000	3/8	8 500
12,5	125 000	1/2	11 325
15,6	156 000	5/8	14 150
18,8	188 000	3/4	17 000
25	250 000	1	22 650

Planification de la gestion des éléments nutritifs

La planification de la gestion des éléments nutritifs consiste simplement à prendre en considération les besoins d'une culture, les concentrations d'éléments nutritifs déjà dans le sol et les éléments nutritifs biodisponibles contenus dans le fumier et d'autres matières de source organique, puis à cor-

riger d'éventuelles carences par des apports de minéraux. Bien des administrations publiques, dont l'Ontario, exigent des exploitations d'élevage intensif qu'elles préparent des plans de gestion des éléments nutritifs, ce qui fait croire à certains que la planification de la gestion des éléments nutritifs n'est qu'une affaire de réglementation. Même s'il s'agit d'une exigence réglementaire pour certaines exploitations, la planification a l'avantage de permettre à toute ferme de faire un usage optimal des éléments nutritifs.

Défis inhérents à différentes intensités d'élevage

Les fermes d'élevage se divisent grosso modo en trois catégories selon l'intensité de leur production. À chaque catégorie correspond des défis particuliers sur le plan de la gestion des éléments nutritifs.

La première catégorie regroupe les exploitations d'élevage intensif qui se procurent de sources commerciales une part importante des aliments servis aux animaux plutôt que de les produire à la ferme. Il en résulte un excédent d'éléments nutritifs reçus par la ferme sur les éléments nutritifs vendus sous forme de viande, d'œufs et de lait. Ces fermes doivent chercher des moyens de céder le fumier produit à d'autres fermes pour éviter le surépandage du fumier et l'accumulation d'une trop grande quantité d'éléments nutritifs dans leurs sols.

La deuxième catégorie réunit les fermes qui reçoivent une quantité d'éléments nutritifs sous forme

Situation de l'Ontario quant à l'équilibre entre production et épandage d'éléments nutritifs

Les détracteurs de l'agriculture intensive prétendent que ce type d'agriculture mène inévitablement à la production excessive et au surépandage d'éléments nutritifs. Ils citent en exemples des régions de la Caroline du Nord et du Delaware où l'expansion des élevages de bétail et de volaille a amené une production de fumier qui excède la capacité d'absorption des éléments nutritifs offerte par la superficie d'épandage. Il en est résulté une dégradation marquée de la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines ainsi que des plaintes au sujet des odeurs et de la piètre qualité de l'air.

La situation est très différente en Ontario. Alors qu'en 2002, compte tenu de l'ensemble des superficies cultivées de l'État, le nombre d'unités nutritives par hectare s'établissait à près de 1 dans l'État du Delaware et à 1,25 en Caroline du Nord, selon les données du Recensement de l'agriculture de 2001, ce nombre s'établissait à 0,65 en Ontario. (Pour l'ensemble du Canada, on parle de 0,43 unité nutritive par hectare.) Une unité nutritive représente le nombre d'animaux d'élevage qui produisent la moindre des valeurs suivantes, soit 43 kilogrammes d'azote ou 55 kilogrammes de phosphate (valeur de remplacement des engrais), ce nombre servant à comparer la valeur fertilisante des fumiers produits par différents élevages.

Il existe évidemment des zones circonscrites où la production d'éléments nutritifs est excédentaire, mais le problème tient davantage à la distribution de ces éléments nutritifs qu'à une surproduction.

d'aliments et d'engrais qui est très proche de l'équilibre avec leurs exportations de viande, d'œufs et de lait. La plupart des aliments et du fumier produits à la ferme sont retournés à la superficie cultivée. Pour ces fermes, le défi consiste à répartir le fumier convenablement entre les champs disponibles. La plupart de ces fermes ont quand même besoin d'engrais minéraux pour équilibrer les éléments nutritifs fournis par le fumier.

La troisième catégorie réunit les fermes qui se caractérisent par une intensité d'élevage très faible et qui sont loin de produire suffisamment de fumier pour répondre aux besoins des cultures. Si ces fer-

mes n'épandent pas suffisamment d'éléments nutritifs sous la forme d'engrais minéraux ou de sources externes d'éléments nutritifs organiques, tels que fumier ou biosolides, leur productivité baissera graduellement au fur et à mesure que les éléments nutritifs sortiront de l'exploitation.

Optimisation du fumier comme source d'éléments nutritifs

L'emploi du fumier comme fertilisant se heurte parfois à des réticences engendrées par l'incertitude quant à sa teneur en éléments nutritifs, à la biodisponibilité de ces éléments nutritifs et à aux quantités de fumier réellement épandues sur

les champs. Une approche systématique à l'utilisation du fumier peut éliminer une bonne part de cette incertitude.

Les épandages de fumier devraient viser à combler jusqu'aux trois quarts environ des besoins en azote de la culture. Il est important de recueillir des échantillons de fumier pendant les opérations d'épandage en vue de leur analyse, de consigner les doses épandues, le délai entre l'épandage et l'incorporation et les conditions météorologiques au moment des épandages. Ces données permettent d'évaluer avec plus de précision les éléments nutritifs assimilables et les carences qui peuvent être comblées au moyen d'épandages d'engrais minéraux.

Cultures bénéficiant d'épandages de fumier

Le maïs-grain est une culture pour laquelle on utilise couramment du fumier, car il a un grand besoin d'azote et qu'il sert souvent d'aliment pour animaux sur les fermes d'élevage. Toutefois, si l'on comble l'ensemble des besoins en azote du maïs au moyen du fumier, on apporte au sol plus de phosphore et de potassium que la culture n'en prélève. Au fil des ans, les concentrations de ces deux éléments dans le sol risquent de devenir excessivement élevées.

Il est possible d'éviter cette accumulation. On peut cultiver le maïs-grain en rotation avec d'autres cultures, comme la luzerne, qui prélèvent de grandes quantités de phosphore et de potassium. On

peut aussi réduire la dose de fumier à deux tiers ou trois quarts des besoins en azote de la culture et compléter les épandages par des apports d'engrais azoté. Cette pratique assure un meilleur équilibre entre les apports de phosphore et de potassium et les prélèvements de ces éléments nutritifs par la culture.

Quand le fumier est épandu l'été sur des cultures sur pied, comme des cultures de maïs ou des cultures fourragères, les doses doivent être inférieures à 40 m³/ha, ce plafond étant plus bas encore dans le cas des fumiers très concentrés. L'épandage de fumier sur des cultures fourragères doit se faire dès que possible après la récolte pour éviter les brûlures d'azote (causées par l'ammoniac) sur les nouvelles feuilles. Les peuplements fourragers bien établis qui renferment une part importante de graminées sont ceux qui bénéficient le plus de l'azote contenu dans le fumier. Les cultures de légumes et de petits fruits peuvent profiter d'épandages de fumier dans la rotation, pourvu que les exigences liées à la salubrité des aliments soient respectées.

Prudence avec les épandages de fumier

Il faut faire preuve de prudence au moment d'épandre du fumier sur des cultures céréalières, des céréales de printemps ou du soya, puisqu'une trop forte dose peut augmenter l'incidence de la verse.

Éviter d'épandre sur des cultures sur pied du fumier concentré à forte teneur en azote ammoniacal, comme du fumier provenant d'ins-

tallations de stockage couvertes ou de porcheries dotées de trémies abreuvoirs, car ce fumier risque de brûler le feuillage.

Semis direct et fumier

Le fumier demeure l'un des facteurs qui rend les éleveurs de bétail réticents à passer au semis direct. Les exploitants qui doivent gérer du fumier et qui pratiquent aussi le semis direct doivent faire des concessions, soit accepter de travailler un peu le sol, soit accepter certaines pertes d'éléments nutritifs compris dans le fumier.

La rotation des cultures est importante dans un système de semis direct. Voici les façons de procéder les plus répandues :

- **Épandage de fumier sur les champs de blé après la récolte, suivi d'un travail superficiel du sol.** Cette façon de procéder procure une dégradation plus rapide des résidus de blé et atténue le risque d'interférence allélopathique pour la culture de maïs prévue tout en dérangeant le sol au minimum et en réduisant les risques qu'il ne se compacte. Cette méthode fait en outre un bon usage des éléments nutritifs présents dans le fumier, particulièrement si elle se double d'une culture de couverture automnale. Sur les sols sableux sujets au lessivage, les taux d'épandage doivent tenir compte de la quantité et du type d'azote épandu. Dans la plupart des cas, le fumier solide à forte teneur en azote

organique comporte moins de risque de pertes par lessivage.

- **Utilisation du fumier sur des cultures fourragères.** Même si les légumineuses fourragères ne tirent pas pleinement profit de l'azote du fumier, elles utilisent néanmoins le phosphore et le potassium. Les graminées fourragères utilisent plus efficacement l'azote et tirent aussi parti du phosphore et du potassium contenus dans le fumier.
- **Épandage avec injection de fumier liquide en bandes latérales dans une culture de maïs sur pied.** De cette façon, le fumier est mis en contact avec la culture au moment où celle-ci a le plus besoin d'éléments nutritifs et où, souvent, le risque de tassement du sol est réduit. Le principal inconvénient est le temps nécessaire. Il y a aussi le risque de voir le peuplement réduit par le piétinement ou les dommages occasionnés aux plants par les injecteurs.

Préoccupations environnementales

L'utilisation de fumier ou d'autres éléments nutritifs de source organique est un moyen écologique de répondre aux besoins des cultures. Toutefois, comme pour toute source d'éléments nutritifs, les épandages excessifs ou mal faits peuvent être nuisibles pour l'environnement en amenant une contamination des

cours d'eau, des eaux de ruissellement et de l'eau de percolation.

Il faut éviter d'épandre du fumier en hiver ou au début du printemps, sous peine de voir les eaux de ruissellement chargées d'éléments nutritifs gagner les eaux de surface. Les sols gelés ne peuvent absorber les éléments nutritifs qui sont épanchés à leur surface et il n'y a pas non plus de culture sur pied pour les prélever du sol. Les années où les épandages hivernaux s'imposent, choisir des champs éloignés des eaux de surface et présentant peu de risques de ruissellement.

Ne jamais épandre de fumier en bordure immédiate d'une eau de surface. Une bande-tampon de végétation aidera à piéger les matières qui pourraient s'écouler du champ et à les garder hors des lacs et des cours d'eau.

La pluie risque d'emporter l'azote organique vers les cours d'eau si le fumier est épanché sur des terres non protégées. Le phosphore fixé aux particules de sol peut être emporté vers les cours d'eau sous l'effet de l'érosion du sol. En réduisant au minimum le ruissellement sur les champs qui reçoivent des épandages de fumier, on réduit du même coup les risques de voir des bactéries dangereuses contaminer les cours d'eau.

Les eaux qui s'écoulent dans les tuyaux de drainage peuvent devenir contaminées si le fumier s'infiltre dans un puisard de drainage. Dans le cas du fumier liquide, conserver une bande-tampon de 9 m autour d'un bassin collecteur ou d'une prise d'eau de surface (cette largeur est de

4,5 m dans le cas du fumier solide), ou stopper l'écoulement dans la canalisation pendant et après l'épandage. Il faut considérer toutes les prises d'eau de surface comme des voies d'accès direct aux eaux de surface et les gérer en conséquence.

L'écoulement peut devenir contaminé si le fumier s'infiltre dans les anfractuosités et les macropores du sol et atteint les drains souterrains. Ce problème risque davantage de survenir dans des sols argileux ou dans des loams argileux où il y a tassement et gonflement du sol. Un léger travail du sol avant l'épandage rompra les voies d'écoulement et réduira au minimum le lessivage des éléments nutritifs. Il peut être également utile de stopper l'écoulement dans les drains pendant et après l'épandage.

Utilisation sans danger de doses de fumier supérieures aux besoins des cultures

Les grandes exploitations d'élevage qui disposent d'une faible superficie cultivable ont des défis particuliers à relever. Pour ne pas épandre trop d'éléments nutritifs, elles peuvent devoir transférer leur fumier à des fermes qui ne pratiquent pas l'élevage ou à des installations de compostage. Quand elles ne peuvent le faire, elles doivent limiter les épandages de fumier aux stricts besoins en azote des cultures, car l'azote excédentaire dans le sol conduirait tôt ou tard à des répercussions environnementales. Si les risques de lessivage de l'azote excédentaire sont minimales dans les sols à texture grossière, les pertes

Valeur du fumier à long terme

Les avantages des épandages de fumier sur une ferme s'étendent au delà de l'année de l'épandage. Ils comprennent :

- la constitution de réserves de phosphore et de potassium dans les sols. L'analyse de sol est le meilleur moyen d'évaluer la biodisponibilité à long terme des éléments nutritifs;
- l'enrichissement du sol d'éléments nutritifs secondaires, d'oligo-éléments et de matière organique;
- l'apport d'azote organique assimilable en quantités décroissantes dans les années suivant l'épandage;
- l'amélioration de la structure et de la capacité de rétention d'eau du sol grâce à la matière organique contenue dans le fumier;
- l'augmentation de la capacité du sol à retenir les éléments nutritifs grâce encore à l'apport de matière organique;
- la diminution des risques d'encroûtement du sol lorsque les épandages de fumier se font périodiquement;
- l'amélioration de la stabilité des agrégats dans le sol qui amène une diminution des coûts de travail du sol et une meilleure résistance aux facteurs de stress.

par dénitrification, qui engendrent l'émission de gaz à effet de serre, peuvent quant à elles être appréciables. Les doses d'engrais azotés peuvent aussi engendrer le surépandage de phosphore et de potassium. Le phosphore excédentaire est préoccupant s'il atteint une eau de surface, car il provoque alors la formation d'algues. Ne pas appliquer de fortes doses dans les zones qui risquent d'être soumises au ruissellement à la surface du sol ou à l'érosion. L'incorporation du fumier peut aussi contribuer à réduire la concentration de phosphore dans les eaux de ruissellement.

Exigences liées à la réglementation

Les épandages de fumier et de biosolides font l'objet d'une réglementation quelconque dans toutes les provinces. Les règlements en vigueur peuvent viser la protection de l'environnement en général et s'appliquer à tous les citoyens, ou viser spécifiquement les personnes qui font des épandages en leur précisant quand et où ces épandages peuvent se faire. En Ontario, les dispositions de nature générale sont contenues dans la *Loi sur la protection de l'environnement* et la *Loi sur les ressources en eau de l'Ontario*, qui prévoient des amendes pour quiconque pollue des eaux de surface ou des eaux souterraines ou leur nuit d'une manière ou d'une

autre. La *Loi sur les pêches* (Canada) interdit par ailleurs de rejeter une substance nocive dans une eau de surface. Dans la deuxième catégorie de règlements, on trouve la *Loi de 2002 sur la gestion des éléments nutritifs* qui donne plein effet aux dispositions visant le stockage, la manutention et l'application de matières renfermant des éléments nutritifs sur des terres.

Il est important d'être au fait des versions les plus à jour des lois et des règlements qui s'appliquent dans un territoire.

Fumier

Les épandages de fumier sur les fermes d'élevage de l'Ontario sont soumis à la *Loi de 2002 sur la gestion des éléments nutritifs*, qui s'assortit du Règlement de l'Ontario 267/03 (tel qu'il a été modifié). Les fermes qui sont soumises aux dispositions d'inclusion progressive du règlement doivent se doter d'un plan de gestion des éléments nutritifs et respecter ce plan lors de tout épandage d'éléments nutritifs. Les producteurs et les conseillers sont invités à consulter le règlement pour plus de détails. La version la plus à jour du règlement est diffusée sur le site www.e-laws.gov.on.ca.

Biosolides

En Ontario, les biosolides sont actuellement soumis à la fois à la *Loi sur la gestion des éléments nutritifs* et à la *Loi sur la protection de l'environnement*. Les matières doivent respecter des critères de qualité visant les agents pathogènes et les métaux avant de pouvoir être épandues sur

des terres. L'épandage de biosolides doit respecter les critères précisés dans le Certificat d'autorisation, les distances de retrait prévues par rapport aux eaux de surface et les délais d'attente avant la récolte prescrits pour diverses cultures. Il est interdit d'épandre des biosolides sur des pelouses et jardins résidentiels, des terrains de golf et des terrains à usage récréatif.

Pour connaître les exigences détaillées relatifs aux épandages de biosolides, voir la version la plus récente des lignes directrices intitulées *Guidelines for the Utilization of Biosolids and Other Wastes on Agricultural Land* et du Règlement de l'Ontario 267/03.

Éléments nutritifs provenant des résidus de culture

Au fur de leur décomposition, les résidus de culture peuvent apporter aux cultures à venir des quantités appréciables d'azote. Si les résidus de légumineuses sont très avantageux à cet égard, les résidus de cultures autres peuvent aussi donner lieu à une minéralisation de l'azote, surtout lorsque de grandes quantités de résidus sont laissés après la récolte (comme en horticulture) et qu'il s'agit de résidus de plantes non parvenues à maturité. Il s'agit là d'une source d'azote qui est sous-utilisée.

Les légumineuses sont un cas d'espèce en agriculture parce qu'elles établissent des rapports symbiotiques avec des bactéries (rhizobiums) qui convertissent

l'azote de l'air en azote ammoniacal, qui est alors assimilable par les plantes. Les légumineuses cultivées d'abord pour la production de semences, par exemple le soya, utilisent la totalité de cet azote pour leur croissance et leur rendement et n'en laissent pas ou sinon très peu dans le sol pour la prochaine culture.

Les légumineuses fourragères vivaces, par ailleurs, sont une source d'azote supplémentaire parce qu'elles tendent à en fixer davantage qu'elles n'en ont besoin pour elles-mêmes. L'azote produit par les légumineuses est fixé presque totalement sous forme organique et n'est pas assimilable tant que les résidus ne se sont pas décomposés. L'azote résiduel doit être pris en compte lorsqu'on planifie un programme de fertilisation pour la culture suivante. Le temps frais du printemps peut ralentir la décomposition des résidus et par le fait même la production d'azote.

Lorsqu'on analyse les effets des légumineuses sur la croissance des prochaines cultures, il est important de distinguer les effets des propriétés physiques, comme l'amélioration de la structure du sol et de son état d'ameublissement, des effets de l'azote résiduel.

Légumineuses dans un système cultural

Les principales légumineuses fourragères qui s'inscrivent dans les rotations des cultures pratiquées en Ontario sont la luzerne, le lotier et le trèfle rouge. La luzerne et le lotier sont habituellement récoltés comme

foin et conservés au moins deux ans. Le trèfle rouge est habituellement inclus dans la rotation comme culture de couverture à la suite de petites céréales, la croissance étant stoppée à la fin de la première année ou au début de la saison de croissance suivante, juste avant les semis de maïs.

Les avantages les plus grands se manifestent dans la première année suivant l'enfouissement. Toutefois, il peut se présenter des effets bénéfiques résiduels au cours des années suivantes. Les concentrations d'azote des nitrates dans le sol à la fin de mai et les rendements indexés indiqués au tableau 5-13, p. 144, laissent voir que les éventuelles hausses de rendement et d'assimilabilité de l'azote à la suite de cultures de légumineuses fourragères sont supérieures la première année après ces cultures.

Accumulation totale d'azote

Le trèfle rouge destiné à servir d'engrais vert et utilisé comme culture de couverture après des céréales, peut également accumuler une quantité appréciable d'azote, soit environ 40 kg/ha pour chaque tonne de parties aériennes par hectare. Un peuplement relativement serré de trèfle rouge de 30 cm de hauteur produit environ 4 tonnes de parties aériennes/ha et contient environ 160 kg de N/ha. Toutefois, les rendements les plus courants du trèfle rouge utilisé comme culture de couverture destinée à servir d'engrais vert à la suite de céréales se situent entre 1 et 3 t/ha.

Azote assimilable provenant des légumineuses

Ce n'est pas tout l'azote produit par les légumineuses qui est assimilable. La vitesse de minéralisation peut limiter la biodisponibilité de l'azote pendant la période où la culture en a besoin, sans compter qu'une partie de l'azote peut se fixer à la matière organique du sol ou se perdre par volatilisation ou lessivage. Il n'en reste pas moins que la quantité d'azote assimilable produit par les légumineuses fourragères peut être considérable et peut souvent combler la totalité des besoins en azote de la culture de maïs qui les suivent. Voir tableau le 5-14, p. 145.

Il est difficile de prévoir avec précision la quantité d'azote assimilable que procurent les légumineuses fourragères, les calculs étant liés à un certain nombre de facteurs, dont le rythme de croissance des légumineuses, la teneur en eau du sol au printemps, la méthode de travail du sol et le moment où les légumineuses sont rabattues.

Évidemment, si le taux de croissance des légumineuses est faible ou si la densité de peuplement est variable d'un secteur à l'autre du champ, les crédits d'azote attribuables aux légumineuses doivent être inférieurs aux valeurs recommandées. Toutefois, si la croissance des légumineuses (luzerne, lotier ou trèfle rouge) a été excellente, les valeurs recommandées sont assez modérées. Selon plusieurs études menées en Ontario, il n'est pas nécessaire de prévoir un apport

d'engrais azoté lorsque le maïs suit un excellent peuplement de légumineuses fourragères.

La biodisponibilité potentielle de l'azote provenant de légumineuses fourragères pour le maïs peut être moindre si le temps en début de saison (mai et juin) est extrêmement sec ou pluvieux. La pluie excessive peut entraîner la dénitrification ou des pertes par lessivage. Si le sol est extrêmement sec, particulièrement en mai ou juin, il se peut que la minéralisation de l'azote contenu dans les légumineuses ralentisse, diminuant ainsi la quantité d'azote biodisponible pour le maïs.

Qu'est-ce qu'une pleine densité de peuplement?

Un peuplement complet de trèfle, de luzerne ou de lotier correspond à toute densité supérieure à 120 plants par m² (12 plants par pi²). Par conséquent, une densité de peuplement de 50 % correspond à 60 plants par m², et une densité de 33 %, à 40 plants par m². Le crédit d'azote est le même, que l'espace entre les plants soit vide ou rempli de graminées et de mauvaises herbes.

TABEAU 5-13. Effets de la rotation des cultures sur la concentration d'azote des nitrates dans le sol après les semis et sur les rendements du maïs

Rotation	Maïs 1 ^{re} année		Maïs 2 ^e année	
	NO ₃ -N dans le sol (kg/ha)	Rendement (%)	NO ₃ -N dans le sol (kg/ha)	Rendement (%)
Monoculture de maïs	9,1	100	9,5	100
Soya-soya-maïs-maïs	12,6	104	10,6	97
Soya-blé-maïs-maïs	10,9	104	12,0	98
Soya-blé + trèfle-maïs-maïs	16,7	107	12,7	99
Luzerne-luzerne-maïs-maïs	17,8	108	14,7	102

Effets de la rotation des cultures sur la concentration d'azote des nitrates dans le sol deux semaines après les semis, et sur les rendements du maïs. Indexation relative à une monoculture de maïs pour les première et deuxième années de production. D'après des données recueillies dans le cadre d'une rotation à long terme.

Source : T. Vyn, Département de phytotechnie, Université de Guelph.

Optimisation de la récupération de l'azote

L'azote n'est utile que s'il est libéré lorsque la culture en a besoin. Si la minéralisation de l'azote se produit trop tôt, l'azote risque de pénétrer dans le sol et d'atteindre une profondeur située hors de portée des racines. Si l'azote est libéré trop tard, la culture souffre d'une carence. Voir la figure 5-5, p. 145.

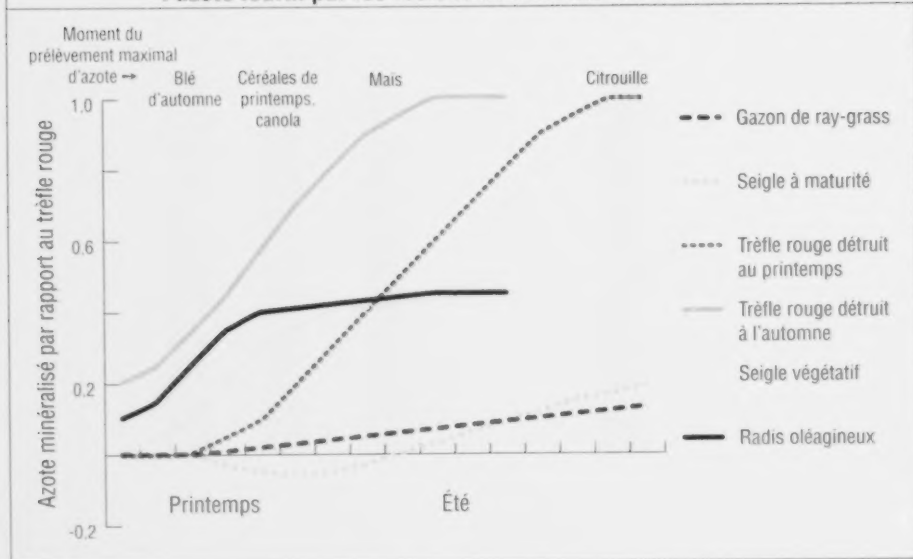
Les méthodes de travail du sol qui incorporent au sol la partie aérienne des légumineuses (passage de la charrue à versoirs, de la charrue chisel ou d'un pulvérisateur) amènent une libération plus rapide de l'azote contenu dans les résidus que le semis direct. L'analyse de données sur le comportement du maïs révèle une biodisponibilité de l'azote provenant d'une culture de couverture de trèfle rouge 10 %

moins grande quand le maïs était soumis au semis direct que lorsqu'il était précédé d'un travail du sol.

Par ailleurs, des études portant sur le semis direct montrent que même si le trèfle rouge fauché au printemps accumule davantage d'azote, le trèfle rouge fauché à l'automne permet un meilleur rendement du maïs en l'absence d'engrais azoté et nécessite moins d'engrais azotés pour optimiser les rendements. Il faut donc en conclure que là où se pratique le semis direct, le trèfle rouge rabattu à l'automne procure davantage d'azote assimilable au moment où le maïs en a besoin que le trèfle rouge rabattu au printemps. Par conséquent, les producteurs qui pratiquent le semis direct devraient envisager de rabattre les légumineuses à l'automne.

Un système de calcul des crédits d'azote ne peut donner qu'une

FIGURE 5-5. Moment et importance de la minéralisation de l'azote fourni par les résidus de cultures de couverture



idée générale de la biodisponibilité de l'azote. Les différents taux de croissance des cultures (et par le fait même les différentes concentrations d'azote dans leurs résidus) et les différentes conditions de sol et conditions météorologiques qui influencent la minéralisation font en sorte que la biodisponibilité

exacte de l'azote varie d'une année à l'autre. Toutefois, le dosage de l'azote des nitrates dans le sol permet de prévoir la nécessité d'un apport d'azote supplémentaire.

Selon une enquête statistique menée dans le sud de l'Ontario en 1994 et en 1996 qui portait sur 25 champs ensemencés de maïs à

TABLEAU 5-14. Correction des besoins en azote après l'enfouissement de légumineuses

Type de culture	kg/ha	lb/ac
Cultures fourragères établies		
moins de 1/3 de légumineuses	0	0
de 1/3 à 1/2 de légumineuses	55	50
1/2 ou davantage de légumineuses	110	100
Légumineuses vivaces semées et retournées la même année	78 (maïs de grande culture)	70 (maïs de grande culture)
	45 (autres cultures)	40 (autres cultures)
Résidus de soya et de haricots de grande culture	30 (maïs de grande culture)	27 (maïs de grande culture)
	0 (autres cultures)	0 (autres cultures)

la suite de trèfle rouge, le dosage de l'azote des nitrates dans le sol effectué avant l'épandage en bandes latérales constitue un moyen aussi bon, voire meilleur, de prévoir les besoins en engrais azoté du maïs que les recommandations de fertilisation azotée du MAAARO.

Biodisponibilité de l'azote provenant de résidus de cultures autres que légumineuses

Dans le cas de nombreuses cultures horticoles, la récolte, qui se fait avant que les plants n'aient atteint la maturité physiologique, ne prélève du champ qu'une partie relativement faible de plants. Ces cultures laissent en place une grande quantité de matières succulentes, vertes qui peuvent se décomposer rapidement et enrichir le sol d'azote minéral. Dans les champs qui servent à différentes cultures, cet azote peut

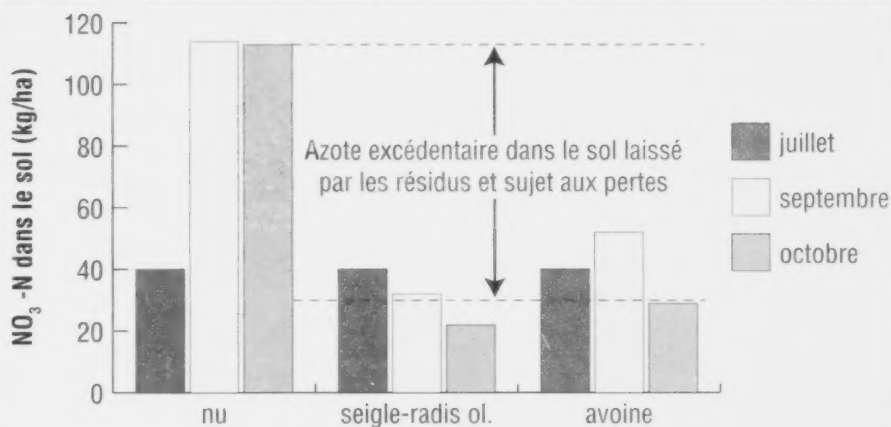
réduire les besoins en engrais pour les cultures qui suivent.

Gestion de l'azote au moyen de cultures de couverture

Des peuplements relativement denses de cultures de couverture en croissance active, notamment des légumineuses comme le trèfle rouge, prélèvent (séquestrent) des quantités appréciables d'azote minéral du sol. Des cultures de couverture qui font suite à celle du blé d'automne en Ontario permettent de réduire de 50 % les concentrations de nitrates présentes dans le sol en octobre et novembre comparativement aux sections laissées sans culture de couverture. Ces cultures font donc en sorte de réduire les quantités d'azote des nitrates biodisponibles qui peuvent se perdre durant l'hiver.

Sous des conditions de croissance optimales, les cultures de

FIGURE 5-6. Immobilisation de l'azote par différentes cultures de couverture après une récolte automatisée de concombres de transformation, 2004



Source : Laura van Eerd, Campus de Ridgetown, Université de Guelph.

couverture autres que de légumineuses (ray-grass, céréales à grains) peuvent prélever des quantités considérables d'azote minéral du sol. Le radis oléagineux soumis à des conditions de croissance optimales pourrait contenir jusqu'à 100 kg d'azote/ha dans ses parties aériennes.

Même si les cultures de couverture autres que de légumineuses peuvent séquestrer une quantité importante d'azote, elles ne font pas augmenter autant le rendement du maïs qui les suit que les cultures de couverture de légumineuses. À ce jour, il a été difficile de démontrer une réduction constante des besoins des cultures en engrais azoté à la suite d'une culture de couverture qui n'est pas une légumineuse.

Le moment où s'effectue la minéralisation de l'azote fourni par les différentes cultures de couverture varie considérablement. Voir la figure 5-5. Le radis oléagineux et les céréales de printemps ont tendance à commencer à libérer de l'azote tôt au printemps, à un moment où cet azote risque de se perdre.

Certaines cultures de couverture, par exemple le ray-grass, résistent étonnamment à la décomposition. Même si elles prélèvent des quantités considérables d'azote, peu de cet azote est rendu biodisponible au cours de la saison de croissance pour la culture suivante.

Il existe des cas où les cultures de couverture peuvent inhiber la croissance de la culture suivante. Une épaisse couche de résidus de

TABLEAU 5-15. Effets des cultures de couverture sur le rendement du maïs et les besoins en azote, Embro

Dose de fumier	Culture de couverture	Azote fourni en 2003 par la culture de couverture	Rendement du maïs en 2004 (sans engrais azoté)	Rendement du maïs en 2004 (avec engrais)	Dose optimale d'engrais azoté
m ³ /ha			kg/ha		
0	Sans culture de couverture	—	6590	9100	96
	Avoine	38	7840	9410	82
	R.O.*	42	7470	8350	67
	Pois	37	6900	9980	102
75	Sans culture de couverture	—	9410	10790	79
	Avoine	64	10730	10730	0
	R.O.*	80	10420	10420	0
	Pois	53	10980	10980	0

* R.O. : radis oléagineux

Source : Ontario Greenhouse Gas Mitigation Project.

culture peut maintenir le sol frais et humide au printemps, ce qui ralentit la germination et la croissance de même que la minéralisation des éléments nutritifs. Elle peut aussi nuire physiquement au fonctionnement des semoirs et réduire ainsi la densité de peuplement. Cette couche de résidus peut par ailleurs abriter

des organismes nuisibles, tels que limaces ou nématodes, qui peuvent s'attaquer aux cultures. Il n'en reste pas moins que les cultures de couverture protègent le sol des érosions éolienne et hydrique et que certaines d'entre elles contribuent même à réduire les populations d'ennemis des cultures comme les nématodes.

Bibliographie

Règlement de l'Ontario 267/03 (modifié par le Règl. de l'Ont. 511/05).

Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario, 2005.

Guidelines for Utilization of Biosolids and Other Wastes. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario et ministère de l'Environnement de l'Ontario, 1996.

Statistique Canada. Recensement de l'agriculture de 2001.

National Agricultural Statistics Service, USDA. 2002 Census.

6 RECOMMANDATIONS DE FERTILISATION

Il n'existe pas de recommandation de fertilisation unique qui soit valable dans toutes les situations. Les recommandations élaborées pour une culture et le milieu précis où elle pousse tiennent compte des données suivantes :

- résultats de l'analyse de sol;
- résultats de l'analyse des tissus végétaux;
- exigences de qualité à satisfaire;
- objectifs de rentabilité, de production et de rendement;
- pratiques culturales;
- risques environnementaux.

Facteurs limitant la réaction des cultures à la fertilisation

De nombreux facteurs influencent les gains de rendement que procure la fertilisation. Le producteur ne peut pas toujours intervenir sur ces facteurs. Les grandes pratiques culturales (gestion de l'eau, du sol et des ennemis des cultures) peuvent faire en sorte que les engrais se traduisent par des gains ou des pertes de rendement. Le tableau 6-1 résume ces facteurs.

TABLEAU 6-1. Facteurs limitant la réaction des cultures à la fertilisation

Facteur	Effet sur l'efficacité de la fertilisation	Exemple
Gestion de l'eau contenue dans le sol		
Sol sec	nuit au transport des éléments nutritifs vers les racines et à leur diffusion dans les végétaux	carence en bore chez la luzerne
	restreint la croissance et l'activité des racines	absence de réaction à l'épandage d'engrais à la surface du sol
	augmente la concentration de sel dans le sol	risque de brûlure des tissus
Sol détrempé	réduit la croissance des racines et leur habileté à prélever les éléments nutritifs	culture de maïs jaune dans les zones inondées
	modifie la composition chimique des éléments nutritifs dans les sols pauvres en oxygène	dénitrification de l'azote; augmentation de la biodisponibilité du Mn dans les ornières
Sol froid et détrempé	réduit la croissance et l'activité des racines	carence en phosphore dans les semis de maïs

TABEAU 6-1. Facteurs limitant la réaction des cultures à la fertilisation (suite)

Facteur	Effet sur l'efficacité de la fertilisation	Exemple
Rotation des cultures		
Structure du sol	influence le volume de sol que les racines occupent	concentrations optimales de P et de K pour le maïs plus élevées lorsque le sol est compacté
Éléments nutritifs rémanents dans les horizons profonds du sol	sont assimilés par les cultures à racines profondes comprises dans la rotation	azote prélevé à des profondeurs plus grandes dans le sol par les betteraves à sucre et les carottes
Culture précédente	influence les réserves et la biodisponibilité des éléments nutritifs dans le sol	besoins en engrais azoté rares dans le maïs qui suit la luzerne
Facteurs agronomiques		
Travail du sol	influence les populations de mycorhizes, celles-ci étant moins grandes quand le sol est davantage travaillé	réaction plus forte des cultures au P contenu dans les engrais de démarrage si le sol est soumis à des méthodes traditionnelles de travail du sol que s'il est soumis au semis direct
	favorise la minéralisation de l'azote	le crédit de N est plus grand quand le sol est travaillé après l'enfouissement d'une culture de couverture de trèfle rouge
	lorsqu'il se fait en profondeur, peut diluer les concentrations d'éléments nutritifs dans le sol	faible niveau de fertilité des buttes érodées où les outils aratoires ramènent le sous-sol en surface
	le semis direct conduit à la stratification d'éléments nutritifs immobiles	réaction plus forte du maïs au K lorsque celui-ci est épandu en bandes dans les systèmes de semis direct
Lutte contre les ennemis des cultures		
Mauvaises herbes	sont favorisées autant que la culture par un sol très fertile	l'épandage en bandes permet de rendre les éléments nutritifs moins accessibles aux mauvaises herbes
Maladies des racines	influencent l'aire superficielle des racines et la quantité des éléments nutritifs que celles-ci prélèvent	besoins accrus en N des haricots blancs lorsqu'ils souffrent de pourriture des racines
Nématodes	nuisent à la capacité des racines de prélever les éléments nutritifs	concentrations optimales de K dans le sol plus grandes en présence du nématode à kyste du soya
Insectes	nuisent au prélèvement d'éléments nutritifs par les racines en réduisant l'aire superficielle à mesure qu'ils s'y attaquent	carences en N et en K engendrées par les attaques de la chrysomèle des racines du maïs

TABEAU 6-1. Facteurs limitant la réaction des cultures à la fertilisation (suite)

Facteur	Effet sur l'efficacité de la fertilisation	Exemple
Facteurs agronomiques		
Choix du cultivar	influence les habitudes d'enracinement en raison de différences génétiques	tendance des cultivars de pomme de terre dotés de petits systèmes racinaires à réagir à des niveaux de fertilité plus grands
	influence l'utilisation finale ou la qualité	dans le cas du blé et de la pomme de terre, variation des recommandations de fertilisation azotée en fonction du cultivar
Verse	réduit les rendements lorsque les cultures sensibles à la verse reçoivent trop d'azote	réduction des doses optimales de N dans les céréales sensibles à la verse
Densité de peuplement et espacement des plants	plus la densité de peuplement est grande, plus les prélèvements d'éléments nutritifs sont importants	selon des recherches visant à maximiser le rendement du maïs, les peuplements de maïs à forte densité réagiraient parfois davantage à la fertilité du sol

Élaboration de recommandations de fertilisation

Les recommandations de fertilisation doivent s'appuyer sur un diagnostic. Celui-ci est indispensable à la gestion de la fertilité des sols et à l'établissement de recommandations. Les outils de diagnostic sont les suivants :

- analyses de sols;
- analyse des tissus végétaux;
- observation des symptômes de carences nutritives.

Une fois le diagnostic établi, l'élaboration de recommandations se heurte à la difficulté de trouver une dose d'engrais qui soit efficace et rentable. Les recommandations de fertilisation peuvent viser à fournir aux cultures une quantité « suffisante » d'engrais ou à garantir « l'accroissement et le maintien

de la fertilité du sol ». Chacun de ces objectifs a ses avantages et ses inconvénients. Un objectif peut être plus pertinent que l'autre pour un élément nutritif ou un système cultural donné. Une chose est sûre : ni l'un ni l'autre de ces objectifs ne procurera les résultats escomptés sans une pondération des résultats d'analyse de sol.

Pondération des résultats d'analyse de sol

Depuis que les analyses de sol existent, elles sont utilisées pour élaborer des recommandations de fertilisation pour la plupart des principales cultures pratiquées en Europe occidentale et en Amérique du Nord. Les analyses de sols peuvent fournir un indice de la biodisponibilité d'une vaste gamme d'éléments nutritifs. Elles

permettent aussi de contrôler, avec le temps, les fluctuations dans la fertilité du sol.

On ne saurait formuler de recommandations de fertilisation valables relativement à des cultures annuelles sans avoir effectué au préalable une analyse de sol. Dans le cas des cultures horticoles vivaces, les recommandations de fertilisation reposent plutôt sur l'analyse des tissus végétaux.

L'analyse de sol ne fournit qu'un indice de la biodisponibilité d'un élément nutritif. Cet indice doit être pondéré en fonction de la réaction réelle de la culture telle qu'elle est mesurée sur le terrain.

La pondération des résultats d'analyse de sol peut se faire suivant différents points de vue. On peut accorder davantage d'importance à la façon dont la culture réagit à l'apport d'un élément nutritif ou encore se concentrer sur le rendement obtenu en fonction de la concentration de cet élément nutritif dans le sol.

Les recommandations ne sauraient reposer uniquement sur les résultats d'une analyse de sol. D'abord parce que cette analyse ne tient pas compte des variables externes telles que températures de croissance fraîches ou précipitations abondantes survenues après le prélèvement des échantillons de sol. Ensuite parce que l'analyse de sol ne permet pas de prévoir si la culture sera gérée de façon à donner son plein potentiel de rendement. Il faut, en plus de l'analyse de sol, tenir compte des facteurs externes qui

peuvent influencer le gain de rendement obtenu à la suite d'apports d'engrais.

Gain de rendement à la suite d'apports d'engrais

C'est au moyen d'expériences menées sur le terrain qu'on précise les apports d'éléments nutritifs nécessaires en fonction des différents résultats d'analyses de sol. Pour ce faire, on applique sur des parcelles différentes présentant un sol relativement uniforme au moins quatre doses différentes, dont une qui est nulle, d'un élément nutritif donné. On reporte ensuite dans un graphique les rendements obtenus en fonction des doses appliquées, puis, on se sert de ces points pour tracer une courbe de rendement, comme celle qui est illustrée à la figure 6-1. Cette courbe permet de déduire une équation mathématique.

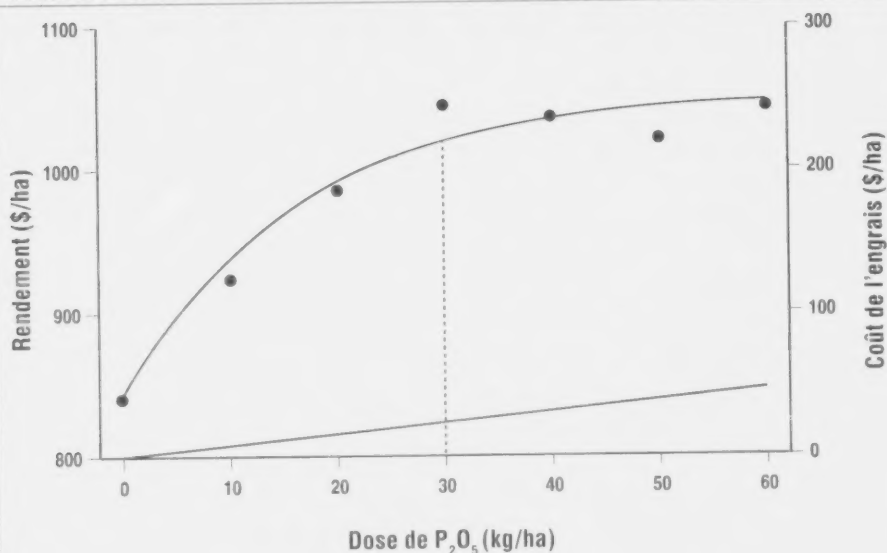
Plusieurs équations mathématiques servent à décrire la courbe de rendement. Le choix de l'équation est arbitraire. Aucune ne traduit tous les processus qui influencent la réaction des cultures aux apports d'engrais. Le choix de l'équation peut avoir une grande influence sur la recommandation de fertilisation. Il reste que la courbe de rendement permet de faire intervenir des critères économiques dans les décisions de fertilisation. La représentation visuelle de la réaction de la culture à la fertilisation a son utilité. Elle permet d'évaluer les retombées financières des décisions de fertilisation illustrées par la courbe.

En connaissant la courbe de rendement, il est possible de tenir compte de l'information sur les prix des engrais. Comme le montre la figure 6-1, cette information permet de calculer la dose d'engrais qui serait optimale sur le plan économique. À mesure que la dose augmente, on observe que la pente de la tangente à la courbe est d'abord très accentuée, puis que cette pente va en diminuant. À partir du point A du graphique, l'augmentation de rendement ne

dépasse plus l'augmentation du coût de la fertilisation. Au delà de ce point, donc, une augmentation de la dose ne procure plus d'avantages économiques. Il s'agit de la dose maximale annuelle qui peut se justifier sur le plan économique.

Le point A correspond à la dose maximale ou optimale sur le plan économique. Des doses supérieures peuvent amener de légères augmentations de rendement, mais celles-ci ne seront pas suffisantes pour justifier le coût supplémentaire en jeu.

FIGURE 6-1. Gain de rendement dans le maïs à la suite d'apports de phosphore



Gain de rendement dans le maïs à la suite d'apports de phosphore, tel qu'il a été mesuré sur l'une des 17 parcelles d'essai dans le cadre d'une étude menée en Ontario par Philom Bios et Dow Elanco. La droite représente le coût de l'engrais. La ligne pointillée à la verticale représente la dose optimale, c.-à-d. celle qui correspond à l'écart le plus grand entre l'avantage obtenu et le coût de l'engrais.

Choix d'une équation traduisant le gain de rendement

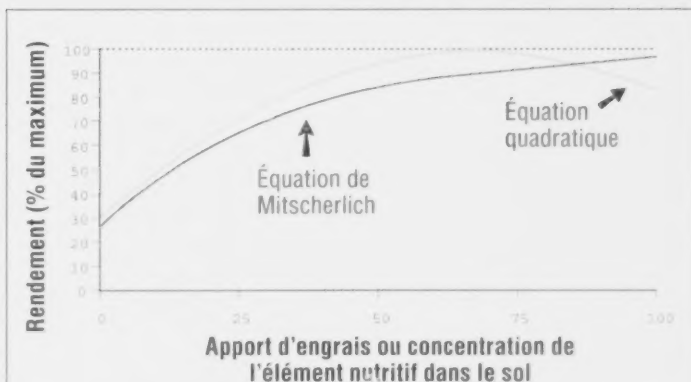
Les essais visant à mesurer les gains de rendement débouchent tous sur des résultats qui sont fonction de valeurs ponctuelles, qu'il s'agisse d'apports d'engrais ou de concentrations d'éléments nutritifs dans le sol. On relie ces données de manière à obtenir une courbe. On se sert ensuite de l'équation dérivée de cette courbe pour prévoir avec plus de précision les besoins en engrais. Le type d'équation retenu pour décrire cette courbe peut influencer sur les résultats.

Aucune courbe n'est nettement meilleure qu'une autre pour décrire le gain de rendement que procure un apport d'engrais. La plupart des équations ont ceci en commun que le gain de rendement calculé diminue à mesure que l'apport d'engrais augmente, de sorte qu'à partir d'un certain point, la valeur du gain de rendement est inférieure au coût des engrais nécessaires pour l'obtenir. Ce point correspond au rendement économique maximal.

L'équation quadratique et l'équation de Mitscherlich sont les équations les plus couramment utilisées pour prévoir les gains de rendement à la suite d'apports d'engrais. L'équation quadratique ($\text{rendement} = a + bx - cx^2$, où x représente la dose, et a , b et c , des constantes dérivées de la courbe) se traduit par une courbe qui montre des gains importants quand les doses d'engrais sont faibles. Le gain de rendement diminue graduellement, de sorte que tôt ou tard, la fertilisation ne procure plus aucun gain de rendement. Enfin, la courbe retombe, ce qui indique que les nouveaux apports se traduiront en fait par des baisses de rendement.

Le coût des apports d'engrais peut être représenté dans le même graphique. Le rendement économique maximal coïncide avec le point qui correspond à la différence la plus grande entre la valeur du rendement et le coût des engrais.

L'équation de Mitscherlich a une forme analogue au



Même si l'équation de Mitscherlich et l'équation quadratique sont représentées par des courbes semblables au départ de la courbe, l'équation de Mitscherlich n'atteint jamais de rendement maximal, tandis que l'équation quadratique atteint un maximum, puis commence à décliner. Dans l'un et l'autre cas, il est extrêmement important de ne pas prolonger la courbe par extrapolation. Le risque d'une erreur d'interprétation serait trop grand.

départ de la courbe, à cette différence près qu'elle n'atteint jamais un rendement maximal. L'équation de Mitscherlich est la suivante : RR (rendement relatif) = $1 - (10^{-(x+b)^c})$ où x correspond soit à l'apport d'engrais ou à la concentration de l'élément nutritif dans le sol, b et c étant des constantes qui ont trait à l'efficacité de l'utilisation de l'engrais.

Les deux équations donnent des résultats semblables quant au rendement économique maximal lorsque les valeurs des engrais et des cultures sont moyennes. Les écarts s'accroissent si la valeur de la culture est élevée ou si le coût des engrais est faible. L'équation de Mitscherlich permet alors de prévoir un rendement économique maximal nettement plus élevé que l'équation quadratique.

Les équations traduisant les gains de rendement à la suite d'apports d'éléments nutritifs sont utiles pour prévoir les doses maximales sur le plan économique, mais, comme tout autre outil, elles ont leurs limites.

Gains de rendement procurés par la fertilité du sol

La pondération des résultats d'analyse de sol établit un lien entre les gains de rendement et les niveaux de fertilité du sol. Ce lien est surtout important dans le cas des éléments nutritifs immobiles comme le phosphore et le potassium.

Pour préciser ce lien, les chercheurs effectuent des expériences dans lesquelles ils s'assurent, par des analyses de sol, que les sols reçoivent différentes concentrations des éléments nutritifs. Pour chaque niveau de fertilité ainsi obtenu, ils doivent faire deux mesures du rendement : une première sans apport de l'élément nutritif et une seconde après un apport suffisamment important pour que la culture soit à même de prélever autant de l'élément nutritif qu'elle peut prélever. Les rendements relatifs, les rendements sans fertilisation, qui représentent une fraction des rendements avec fertilisation, sont mis

en rapport avec les concentrations d'éléments nutritifs dans le sol. On obtient ainsi le niveau critique au delà duquel la fertilisation procure rarement un avantage sur le plan économique.

Probabilité de gain de rendement compte tenu de la fertilité du sol

Lorsque des expériences sont menées sur de nombreuses années, on constate que la courbe de rendement, qui peut être précise lorsqu'on établit une moyenne, ne représente pas toujours fidèlement les résultats réels pour une année donnée. Cette variabilité des gains de rendement donne lieu à différentes façons d'interpréter les résultats d'analyse de sol. L'une d'elle consiste à reporter sur un graphique la fréquence des gains de rendement positifs obtenus en fonction des résultats d'analyse de sol. Le dosage des éléments nutritifs devient ainsi un indicateur de la probabilité que la culture réagisse à la fertilisation.

Le tableau 6-2 décrit la probabilité d'une réaction de la culture à la fertilisation dans des sols affichant différents niveaux de fertilité. En général, les cultures qui poussent dans des sols pauvres affichent le plus souvent un gain de rendement à la suite de la fertilisation et s'assortissent de doses optimales d'engrais élevées. Dans les sols riches, les cultures réagissent rarement à la fertilisation et les doses optimales sont plus faibles.

Dans certaines cultures, une réaction est observée à la suite de l'application d'engrais de démarrage ou de phosphore dans la raie de semis à des niveaux de fertilité du sol où l'on n'observe plus aucune réaction lorsque l'engrais est épandu en pleine surface.

Les sols riches nuisent-ils à l'environnement?

Les pertes d'éléments nutritifs provenant du sol peuvent nuire à la qualité des eaux. Le risque dépend à la fois de la source et du transport des éléments nutritifs. Si le sol est riche, la source est plus importante, mais pas le transport. C'est d'ailleurs pourquoi la concentration de phosphore n'est que l'un des éléments pris en compte dans l'indice de phosphore. Sur les terres où les risques d'érosion et de ruissellement sont élevés, la maîtrise de la fertilité du sol joue un rôle relativement plus important. Dans les sols où le risque de ruissellement est faible, par contre, d'importants épandages de fumier qui améliorent la qualité du sol peuvent amener une augmentation de la concentration de P dans le sol sans que la qualité des eaux n'en souffre.

TABLEAU 6-2. Probabilité de réaction à la fertilisation à différents niveaux de fertilité du sol

Niveau de fertilité du sol	Gain de rendement	Probabilité de gain	Dose optimale
faible	élevé	la plupart du temps	élevée
moyen	moyen	environ la moitié du temps	moyenne
élevé	faible	occasionnelle	faible
très élevé	très faible	sporadique	très faible
excessif	nul	négligeable*	nulle

*La fertilisation de sols qui renferment déjà des teneurs optimales en éléments nutritifs peut réduire les rendements ou la qualité des cultures en nuisant au prélèvement d'autres éléments nutritifs.

Élaboration des recommandations de fertilisation : « fertiliser la culture » ou « fertiliser le sol »

Il y a deux types de recommandations de fertilisation. Le premier, qui vise la fertilisation de la culture, consiste à apporter une quantité « suffisante » d'engrais. Le second, qui vise la fertilisation du sol, consiste à faire un apport qui assure « l'accroissement et le maintien de la fertilité du sol ». Le tableau 6-3 présente une synthèse des deux types de recommandations de fertilisation.

Une fertilisation suffisante vise à combler les besoins de la culture en cours. Les recommandations de fertilisation du MAAARO de même que celles qui sont formulées par certains États américains, dont l'État de New York, voisins sont de ce type. Ces recommandations tiennent compte des concentrations d'éléments nutritifs dans le sol telles qu'elles sont révélées par les analyses de sol. Les recommandations de fertilisation visent une rentabilité optimale par l'accroissement de la valeur de la culture en cours. Il s'agit du type de recommandation qui est privilégié pour les éléments nutritifs, comme l'azote, qui sont sujets à des pertes dans le sol. Ce type de recommandation peut aussi être utilisé pour d'autres éléments nutritifs, notamment le phosphore et le potassium.

L'objectif de la fertilisation suffisante n'est pas de porter la fertilité du sol à un niveau cible. De plus fortes doses d'engrais sont recom-

mandées dans les sols pauvres et de plus faibles doses, dans les sols riches. Ce type de recommandation vise à maintenir la fertilité du sol proche du niveau critique.

L'autre type de recommandations vise l'accroissement et le maintien de la fertilité du sol plutôt qu'une réaction immédiate des cultures. La fertilisation vise alors à garantir que les cultures bénéficient d'un niveau de fertilité du sol qui ne limite aucunement leur croissance.

Au cours de la phase d'accroissement de la fertilité du sol, les apports d'engrais visent à augmenter le niveau de fertilité du sol. Au cours de la phase de maintien de la fertilité du sol, il s'agit de maintenir un niveau de fertilité cible. Lorsque les concentrations d'éléments nutritifs dans le sol sont supérieures aux fourchettes cibles, les doses recommandées tombent à zéro. Voir la figure 6-3, p. 164.

Les avantages d'investir dans l'accroissement et le maintien de la fertilité du sol ne se font pas tous sentir en un an. Par exemple, quand on tient compte des coûts et des gains de rendement d'une année uniquement, il se peut que ceux-ci ne justifient que 90 % de la dose correspondant au rendement maximal alors que quand on tient compte des gains que procure à long terme la rémanence dans le sol des éléments nutritifs, le pourcentage de la dose correspondant au rendement maximal qui se justifie peut être plus élevé (Reetz et Fixen, 1992).

Il est important dans ce type de recommandation, de tenir compte de tous les coûts, notamment de

Élaboration de recommandations de fertilisation : l'outil de calcul ontarien des apports d'azote dans le maïs

Les recommandations d'azote pour le maïs ont été mises à jour en 2006. Les données recueillies au cours de 41 ans d'essais portant sur l'azote et les courbes de rendement ont été soumises à de nouveaux calculs conformes à un modèle quadratique avec plateau. La dose optimale d'azote pour chaque site-année a été établie et les facteurs ayant les plus grandes répercussions sur les doses d'azote optimales ont été utilisés pour élaborer un modèle visant à prévoir les besoins en azote de champs en particulier.

Les facteurs pris en compte dans le modèle étaient le potentiel de rendement du champ (rendement moyen au cours des cinq dernières années), la texture du sol, la culture précédente, la fourchette d'unités thermiques, le moment de la fertilisation et le prix relatif du maïs et des engrais azotés.

Pour plus d'information sur l'outil ontarien de calcul des apports d'azote dans le maïs (disponible en anglais seulement), se reporter au site Web du MAAARO au www.ontario.ca/cultures, puis cliquer sur « Maïs ».

l'amortissement de l'investissement sur plusieurs années. Le coût de l'investissement comprend à la fois les frais d'intérêt et les coûts d'opportunité. Si d'autres possibilités de placement pouvaient procurer de meilleurs rendements, il serait plus avantageux de renoncer aux apports d'engrais destinés à accroître la fertilité du sol.

Nombre de laboratoires commerciaux, d'États et d'universités,

notamment en Pennsylvanie, en Ohio, au Michigan et en Indiana, font des recommandations qui visent l'accroissement et le maintien de la fertilité du sol. Les recommandations de ce type peuvent varier considérablement d'un laboratoire à l'autre. Elles sont influencées par les hypothèses qui sont posées quant à l'accroissement de la fertilité par unité d'engrais et quant au temps nécessaire à cet accroissement.

TABLEAU 6-3. Comparaison des recommandations de fertilisation suivant les deux méthodes de pondération des résultats d'analyse

Pondération en fonction d'une fertilisation suffisante	Pondération en fonction de l'accroissement et du maintien des éléments nutritifs dans le sol
Hypothèses	
<ul style="list-style-type: none"> • Le coût des éléments nutritifs épandus est compensé par le gain de rendement de la culture en cours. • Aucune valeur économique n'est accordée à l'effet rémanent de l'engrais. • Les gains de rendement procurés par de fortes doses d'engrais dans des sols peu fertiles sont à peu près les mêmes que ceux que procurent de faibles doses dans des sols très fertiles. 	<ul style="list-style-type: none"> • L'élément nutritif épandu ne se trouve pas fixé au sol de façon irréversible. • L'élément nutritif n'est pas soumis à des pertes par lessivage ou volatilisation. • Les investissements dans la fertilité du sol profiteront un jour au producteur.
Avantages	
<ul style="list-style-type: none"> • Type de recommandation qui, selon les analyses faites sur une seule année, procure le rendement net le plus élevé sur l'investissement en engrais. • Type de recommandation valable pour les éléments nutritifs mobiles et immobiles dans le sol. 	<ul style="list-style-type: none"> • Type de recommandation qui rend compte des avantages des engrais rémanents. • Type de recommandation qui donne la meilleure garantie que le rendement ne sera pas limité par les éléments nutritifs.
Inconvénients	
<ul style="list-style-type: none"> • Type de recommandation permettant difficilement de prévoir avec précision la dose la plus économique dans un contexte particulier, car les gains de rendement peuvent varier selon le type de sol, les méthodes de travail du sol, la variabilité dans le sol, le cultivar et la météo. • Type de recommandation assorti d'un risque plus grand de sous-fertilisation (voir tableau le 6-7, p. 169). 	<ul style="list-style-type: none"> • Type de recommandation qui s'applique uniquement aux éléments nutritifs immobiles et qui ne convient donc pas à l'azote. • Type de recommandation qui oblige à amortir les coûts de fertilisation sur plusieurs années afin d'en bénéficier pleinement sur le plan économique.

TABLEAU 6-4. Quel type de recommandation choisir

Comme dans tout système biologique, l'incertitude est un facteur omniprésent. On ne peut prévoir exactement les rendements qu'offriront les cultures soumises à un ensemble précis de facteurs.

Sur une longue période, l'écart entre les bénéfices nets obtenus à la suite de l'application des deux grands types de recommandations de fertilisation n'est pas énorme, dans la mesure où les recommandations reposent sur des données valides. Toutefois, il existe des facteurs qui favorisent chaque système.

Facteurs favorables à la pondération en fonction d'une fertilisation suffisante :	Facteurs favorables à la pondération en fonction de l'accroissement et du maintien de la fertilité du sol :
<ul style="list-style-type: none">• Tenure de courte durée, contrats de location annuels;• Volonté de ne pas dépenser plus qu'il ne faut;• Culture de peu de valeur et prix élevé des engrais;• Autres possibilités d'investissement procurant de meilleurs taux de rendement;• Conversion des éléments nutritifs en des formes non biodisponibles;• Éléments nutritifs sujets à des pertes dans le sol;• Rendement limité par des raisons autres que la fertilité;• Prévision de stabilité de la valeur des cultures et des prix des engrais.	<ul style="list-style-type: none">• Tenure de longue durée;• Volonté d'éviter que la fertilité ne soit un facteur limitant les rendements;• Cultures de grande valeur et à haut rendement;• Absence d'une meilleure possibilité d'investissement des capitaux ou d'achat de matériel;• Disponibilité de sources économiques d'éléments nutritifs, tels que fumier ou biosolides;• Éléments nutritifs retenus dans le sol sous des formes assimilables;• Prévision d'une hausse de la valeur des cultures et des prix des engrais;• Cultures comprises dans la rotation exigeant un haut niveau de fertilité du sol.

Exemple des deux types de pondération des résultats d'analyse de sol

La figure 6-2 fournit des exemples de courbes de rendement du maïs pour trois concentrations différentes de phosphore dans le sol (sur des parcelles d'essais différentes). L'agent d'extraction utilisé pour le dosage du phosphore était le bicarbonate de sodium. Les doses les plus économiques ont été calculées en fonction des prix de 150 \$/tonne pour le maïs et de 0,80 \$/kilogramme pour l'engrais phosphoré (P_2O_5).

L'application stricte de la pondération en fonction d'une fertilisation « suffisante » donnerait, d'après les données de l'année en cours, les doses économiques maximales d'engrais phosphoré indiquées au tableau 6-5. Ce tableau n'est qu'un exemple. Il faut mener un nombre beaucoup plus grand d'expériences pour monter une table complète de recommandations. Pour le même niveau de fertilité du sol, les courbes de rendement peuvent varier selon le type de sol et la texture du sol. C'est ce qui explique que les recommandations visant les trois emplacements choisis dans l'exemple s'écartent un peu des recommandations courantes.

Les recommandations courantes sont pondérées en fonction d'une fertilisation suffisante, mais elles prévoient des marges qui tiennent compte de la variabilité du sol et des réactions des cultures aux engrais de démarrage, particulièrement en ce qui a trait au phosphore. Il

ne faut pas oublier que les recommandations courantes reposent sur un nombre bien plus considérable d'expériences que dans l'exemple et qu'elles sont par conséquent plus fiables comme lignes directrices générales.

Le diagramme de la figure 6-5 illustre le rendement relatif du maïs non fertilisé en pourcentage du rendement du maïs fertilisé, tel que ce rendement est établi à partir des réactions du maïs aux apports de P dans l'exemple illustrant le type de recommandation pondérée en fonction d'une fertilisation suffisante. La ligne horizontale est tracée à 95 %, qui correspond au rendement relatif choisi comme économiquement réalisable. La ligne verticale est tracée de manière à laisser le moins de points possibles dans les quadrants B et D. Cette ligne représente le niveau critique.

Dans ce cas, un niveau critique de 16 ppm est préconisé. Au delà, on ne recommanderait que des doses de maintien. En deçà, la dose recommandée est celle qui est nécessaire pour relever et maintenir le niveau de fertilité du sol. Les doses recommandées varieront selon la durée prévue pour l'accroissement du niveau de fertilité du sol.

Le tableau 6-5 donne un exemple de recommandation pondérée en fonction de l'accroissement et du maintien de la fertilité du sol. Ce type de recommandation repose sur trois hypothèses :

- Il faut 37 kg de P_2O_5 /ha pour augmenter de 1 ppm la concentration de cet élément nutritif

dans le sol (Richards et coll., 1995).

- Il faut quatre ans pour porter le niveau de fertilité du sol au niveau critique.
- La dose nécessaire au maintien correspond aux prélèvements prévus par la culture qui sont de 55 kg/ha.

La figure 6-4 explique comment se calcule la recommandation visant le phosphore. Dans cet exemple, le niveau existant de fertilité du sol est de 9 ppm. Pour calculer la dose recommandée, on soustrait de la concentration cible de 16 ppm, la concentration présente dans le sol, soit 9 ppm. On multiplie le solde par la quantité nécessaire pour élever la concentration dans le sol d'une unité (37), puis on divise le produit obtenu par le nombre d'années (4). On ajoute au quotient obtenu la dose de maintien de 55. Ce calcul donne des doses plus élevées que les recommandations pondérées en fonction d'une fertilisation suffisante, même s'il utilise les mêmes données.

La justification économique de ces doses est assez complexe. Elle repose sur les hypothèses mentionnées plus haut ainsi que sur les suivantes :

- Le taux d'intérêt est inférieur à 20 %;
- La période d'amortissement est d'au moins six ans;
- Le rendement atteignable est de 9 t/ha (150 boiss./ac);
- La courbe de rendement relatif est la même que dans la figure 6-6.

Dans la pratique, les recommandations pondérées en fonction du maintien de la fertilité du sol sont valables pour des fourchettes de fertilité données. Au delà des fourchettes prévues, les doses commencent à décliner. Voir la figure 6-3.

Le maintien de la fertilité du sol dépend des prélèvements effectués par la culture et n'a pas d'incidence directe sur la réaction de la culture. Par conséquent, la dose de maintien doit reposer sur un rendement moyen de la culture pour le champ, plutôt que sur un objectif de rendement.

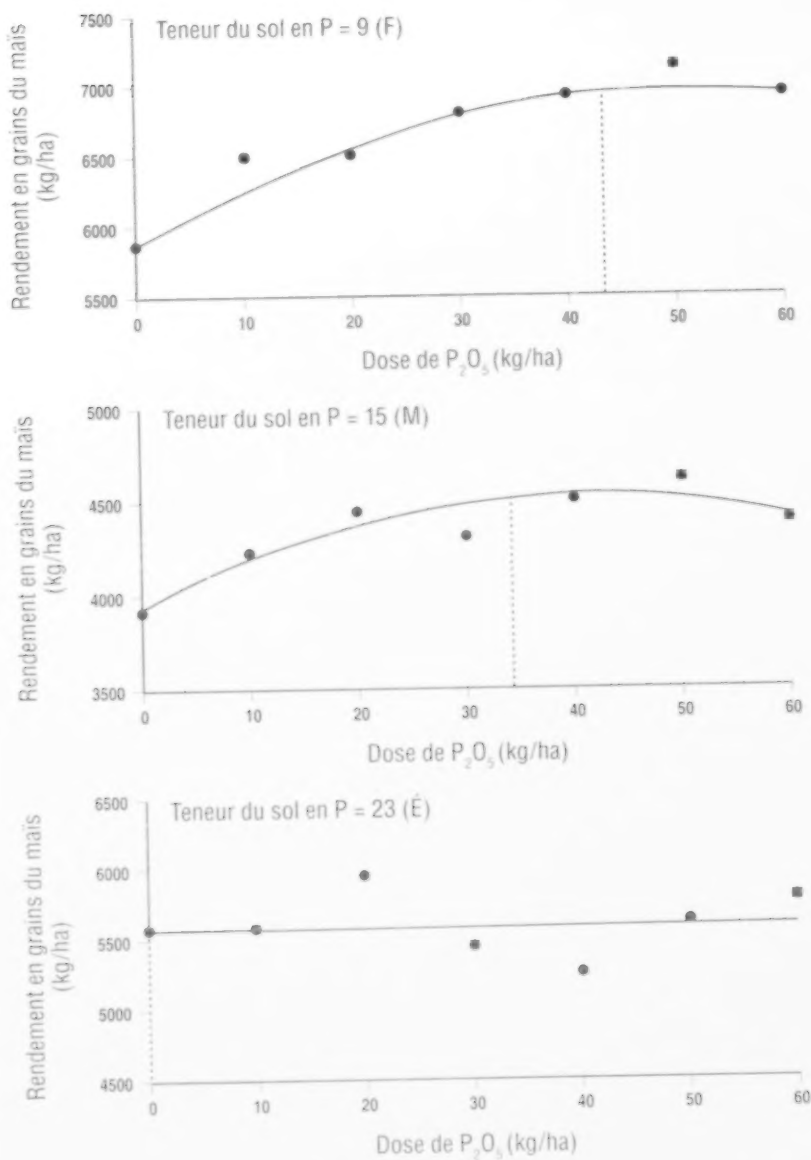
Autres points à considérer

Objectif de rendement

Le rendement espéré influence les décisions concernant les doses d'engrais. Il est évident que le rendement final est ce qui permet de compenser les coûts des intrants, de sorte que les cultures de plus grande valeur et celles qui procurent des rendements élevés sont celles qui ont tendance à recevoir plus d'engrais.

À long terme, les forts rendements s'accompagnent de prélèvements plus importants d'éléments nutritifs dans le sol, ce qui oblige à faire des apports plus importants d'engrais. À court terme, l'objectif de rendement ou le niveau de rendement peut n'avoir que peu d'effet ou même aucun sur la dose maximale économique d'engrais (sauf pour l'azote). Les sols offrant un potentiel de rendement élevé ont

FIGURE 6-2. Pondération en fonction d'une fertilisation suffisante



Courbes de rendement obtenues à partir des résultats d'essais menés à trois emplacements en Ontario dans des sols ayant des teneurs en phosphore différentes. Les lignes verticales indiquent la dose la plus économique.

TABLEAU 6-5. Comparaison des doses recommandées selon le type de pondération

Teneur du sol en P (ppm)	Dose de P_2O_5 (pondération en fonction de l'accroissement et du maintien de la fertilité du sol) (kg/ha)	Dose maximale économique de P_2O_5 (une année, un site) (kg/ha)	Dose de P_2O_5 (recommandation courante en Ontario) (kg/ha)*
9	120	43	70
15	64	34	20
23	55	0	20

* Recommandations tirées de la publication 811F du MAAARO, *Guide agronomique des grandes cultures*.

une couche arable épaisse et une excellente structure. Les racines s'y développent aisément, de sorte qu'elles prélèvent l'eau et les éléments nutritifs à même un plus grand volume de sol.

Dans le cadre de recherches menées au Collège de technologie agricole de Ridgetown, une culture de maïs a donné un rendement de 18,4 t/ha en 1985 sur des parcelles d'essais situées près de Chatham (Stevenson, 1983). Nombre de facteurs ont contribué à ce rendement élevé, notamment des facteurs inhérents au sol, l'irrigation et les éléments nutritifs contenus dans les apports importants d'engrais et de fumier, les facteurs les plus importants ayant été, selon les chercheurs, le

FIGURE 6-3. Pondération en fonction de l'accroissement et du maintien de la fertilité du sol

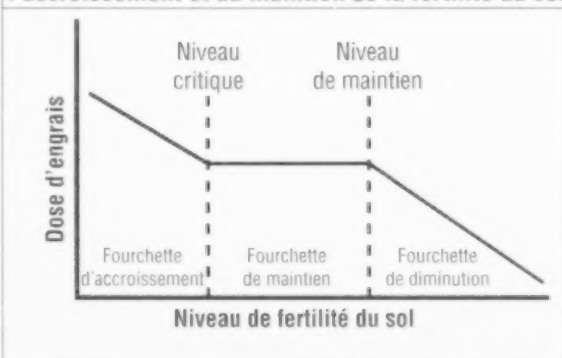


FIGURE 6-4. Calcul de la dose nécessaire à l'accroissement et au maintien de la fertilité du sol

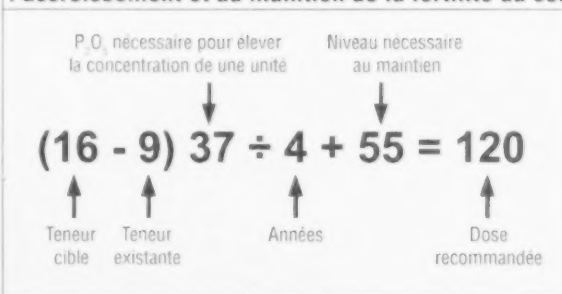
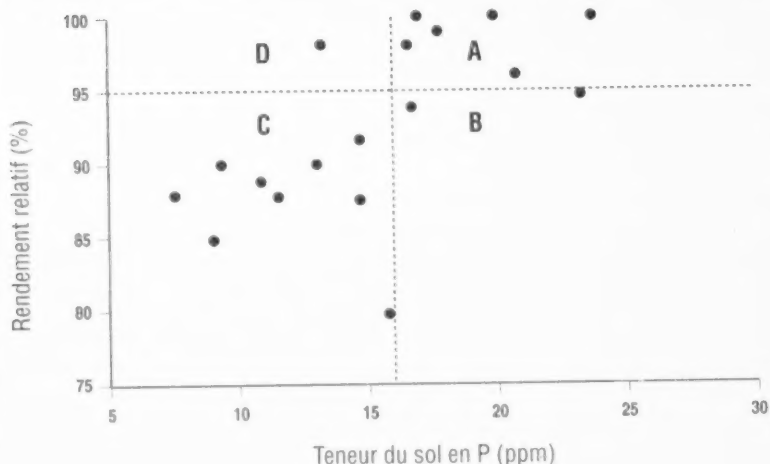


FIGURE 6-5. Détermination du niveau critique de fertilité du sol



Rendement relatif du maïs en fonction de la teneur du sol en P dans 18 sites-années visés par une étude menée en Ontario par Philom Bios et Dow Elanco (1993-1994).

choix des hybrides et la densité de peuplement. Voici quels étaient les niveaux de fertilité des sols dans les parcelles d'essais avant les apports d'engrais :

pH	P	K	Mg	Ca
	ppm	ppm	ppm	ppm
6,8	48 TÈ	161 TÈ	405 É	2774

Il serait vain d'essayer d'atteindre ces niveaux et d'attendre les mêmes rendements uniquement à partir de la réponse due à la fertilité du sol.

Pourcentages et ratios de saturation en bases

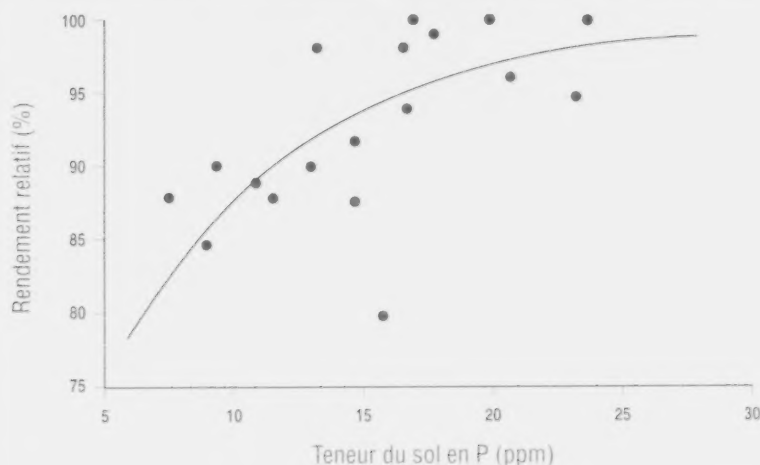
Les ratios ou pourcentages d'éléments nutritifs qui sont des cations basiques (calcium, magnésium et potassium) servent parfois d'indicateurs de l'assimilabilité de

ces éléments nutritifs. Il s'agit de reconnaître les interactions entre les cations.

Les cations basiques (Ca, Mg et K) ont des effets antagonistes connus les uns sur les autres. C'est dire qu'une très forte teneur du sol en un cation peut nuire à la biodisponibilité de l'un des autres. En pratique, toutefois, les interactions entre éléments nutritifs ne sont importantes que lorsque la concentration de l'un des éléments nutritifs avoisine la carence.

La notion de saturation en bases remonte aux années 1940; on la doit à des chercheurs du New Jersey. Dans une série d'expériences réalisées en serre sur une période de huit ans, ces derniers ont chaulé et fertilisé des sols acides, infertiles, pour y faire pousser de la luzerne,

FIGURE 6-6. Rendement relatif en fonction de divers niveaux de fertilité du sol



tout en mesurant la saturation en bases des sols. Ces chercheurs suggéraient que le complexe d'échanges cationiques devait être occupé par 65 % de calcium, 10 % de magnésium, 5 % de potassium et 20 % d'hydrogène. Il est important de signaler que, même si la culture a bien poussé grâce à ces niveaux d'éléments nutritifs dans le sol, il n'est pas nécessairement indispensable de retrouver des proportions identiques pour assurer la croissance des cultures.

De nombreux essais menés depuis l'étude initiale ont permis de constater qu'un vaste éventail de ratios Ca:Mg:K ou de pourcentages de ces éléments ne compromet nullement la croissance des cultures tant qu'il n'y a pas carence de l'un de ces éléments nutritifs. Selon une étude portant sur la luzerne et le lotier réalisée dans l'État de New York, des ratios Ca:Mg allant de

267:1 à 1:1 n'ont aucune influence marquée sur les rendements (Reid, 1996).

L'élaboration de recommandations de fertilisation fondées sur l'utilisation des ratios de saturation en bases ou des pourcentages de cations comporte deux désavantages :

- Ces recommandations ne tiennent compte d'aucune analyse économique qui serait pourtant pertinente surtout dans les sols riches en calcium et en magnésium. Ces programmes de fertilisation peuvent être extrêmement coûteux.
- Bien des sols alcalins de l'Ontario regorgent de minéraux carbonés. L'agent d'extraction utilisé lors de l'analyse de sol risque de dissoudre ces minéraux, de provoquer la libération du calcium et du magnésium dans l'extrait et de surestimer

du coup la CEC calculée et les pourcentages de calcium et de magnésium, ce qui peut donner lieu à des apports recommandés de potassium qui sont exagérément élevés.

La notion de ratio de saturation en bases a néanmoins le mérite de reconnaître les extrêmes dans les ratios entre cations, particulièrement dans les sols dont la CEC et la fertilité sont très faibles. Le potassium en particulier peut nuire au prélèvement du magnésium. Il faut donc être vigilant lorsque les analyses révèlent des sols riches en potassium et pauvres en magnésium, de manière à garantir des réserves suffisantes de magnésium dans le sol. Cette interaction joue aussi un rôle dans la maîtrise de problèmes nutritionnels chez les ruminants, comme la tétanie d'herbage.

Réglage des doses recommandées de potassium en fonction de la capacité d'échange cationique (CEC)

Certains États américains modifient la dose recommandée de potassium en fonction de la CEC. Au Michigan, en Ohio et en Indiana, les doses recommandées de potassium augmentent de pair avec la CEC. Cette pratique repose sur des essais menés dans le sud de l'Ohio. Les sols argileux de cette région peuvent fixer des quantités appréciables de potassium. Les besoins en potassium sont donc plus grands dans les sols à texture lourde, à la fois pour mieux répondre aux besoins des cultures et pour constituer des réserves contribuant à la

fertilité des sols. Les argiles des sols jeunes du nord de l'Ohio renferment davantage de potassium natif. Ces sols ne fixent pas aussi facilement cet élément. Dans ces sols, la teneur en argile ou la CEC n'ont que peu d'effet sur la quantité de potassium nécessaire.

Dans l'État de New York, pour une concentration donnée de potassium dans le sol, les doses recommandées de cet élément sont plus fortes si les sols sont sableux et que la CEC est faible. Selon des recherches menées dans cet État, les sols à plus forte teneur en argile libèrent davantage de potassium par météorisation, de sorte que les cultures ont moins besoin d'engrais potassiques pour offrir un rendement optimal.

Les recherches menées en Ontario n'ont pas permis d'observer d'effet appréciable de la CEC sur la dose de potassium nécessaire.

Variabilité spatiale

La détermination des doses d'engrais se fait normalement sur de petites parcelles où la fertilité du sol est relativement uniforme. Or, la plupart du temps, les concentrations d'éléments nutritifs dans les sols varient considérablement à la grandeur des champs. Dans les champs ontariens qui ont fait l'objet d'un échantillonnage intensif, on observe un coefficient de variation qui varie de 18 à 54 % pour le nitrate, de 20 à 140 % pour le phosphore, de 12 à 70 % pour le potassium et de 50 à 60 % pour les oligo-éléments.

Cette variation dans les concentrations d'éléments nutritifs

signifie qu'une partie d'un champ affiche un niveau de fertilité supérieur à la moyenne et par conséquent un gain de rendement attribuable aux apports d'engrais inférieur à la moyenne. Une autre partie du champ affiche un niveau de fertilité inférieur à la moyenne et un gain de rendement en réponse à la fertilisation supérieur à la moyenne.

Le gain de rendement découlant de l'épandage d'engrais supplémentaires dans les zones où l'analyse de sol révèle un faible niveau de fertilité est généralement supérieur au coût du surplus d'engrais appliqué sur les zones de plus grande fertilité. À mesure que la variation de la fertilité augmente dans un champ, la fertilisation procure des gains de rendement sur une superficie de plus en plus grande du champ. Par conséquent, dans les champs à la fertilité variable, la dose unique d'engrais la plus rentable qui doit être appliquée à l'ensemble du champ est plus grande que dans un champ uniforme.

Le tableau 6-6 décrit l'effet de la variabilité dans la fertilité du sol sur les doses optimales d'engrais. Le tableau montre que plus la variabilité spatiale augmente, plus la dose optimale constante de potassium augmente également, surtout dans les sols riches en potassium.

TABLEAU 6-6. Influence de la variabilité des concentrations de K dans le sol sur la dose optimale d'engrais potassique en Ontario

Teneur moyenne du sol en K (ppm)	Variabilité dans la fertilité du sol		
	Nulle	Moyenne Dose optimale de K ₂ O (kg/ha)	Élevée
45	100	101	106
90	50	58	77
135	0	30	58

Le coefficient de variation est de 0 % pour une variabilité nulle, de 53 % pour une variabilité moyenne et de 131 % pour une variabilité élevée.

Source : Kachanoski et Fairchild, 1994.

La reproduction précise sur une carte de la variabilité de la fertilité du sol d'un champ permet d'obtenir les mêmes rendements avec des augmentations de doses moindres que celles qui sont indiquées dans le tableau. Il s'agit d'appliquer des doses d'engrais variables sur les zones les plus à même de bénéficier de la fertilisation. Le prélèvement d'échantillons à raison de un échantillon par hectare risque de ne pas refléter fidèlement cette variabilité. La technologie permettant l'application de doses variables existe déjà, mais on commence à peine à élaborer des cartes suffisamment précises pour ces applications.

Dans les champs où la fertilité est très variable, il est possible d'augmenter la rentabilité de la fertilisation en appliquant des doses variables, pourvu qu'une bonne superficie du champ soit à même de bénéficier de telles applications.

TABLEAU 6-7. Influence de la sous-fertilisation et de la surfertilisation sur le rendement net

Dose d'engrais (lb de N/ac)	Rendement (boiss./ac)	Valeur de la culture	Coût des éléments nutritifs \$/ac	Rendement net	Écart
64 (1/3 de moins)	129	359,80	25,64	334,16	5,88
96 (recommandée)	135	378,28	38,24	340,04	
127 (1/3 de plus)	138	386,68	50,96	335,72	4,32
Hypothèses de prix : Maïs à 2,80 \$/boiss., N à 0,40 \$/lb. Source : moyenne de 109 essais visant à vérifier l'efficacité de la fertilisation azotée effectuées par le MAAARO de 2001 à 2005.					

Coûts de la sous-fertilisation et de la surfertilisation

On voit à la figure 6-2 que la pente de la tangente à la courbe de rendement décroît à mesure que la dose d'engrais augmente. Par conséquent, le gain de rendement que procure une dose donnée en situation de sous-fertilisation est supérieur au gain de rendement que procure la même dose en situation de surfertilisation. Voir le tableau 6-7.

En cas de doute quant à la pertinence d'une dose, il faut toujours se dire que la surfertilisation risque de faire perdre moins de profits que la sous-fertilisation. La différence réelle est tributaire de la forme de la courbe de rendement. Ce principe est d'autant plus vrai dans le cas d'éléments nutritifs comme l'azote, pour lesquels les gains de rendement sont relativement linéaires jusqu'à ce qu'un plateau soit atteint.

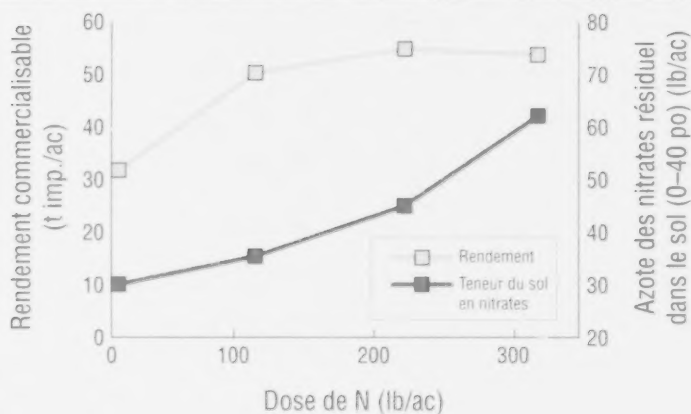
Dans le cas des éléments nutritifs qui sont nuisibles à l'environnement, la surfertilisation pose cependant un problème. Il est important de faire tout ce qui est possible pour

établir les recommandations avec un maximum de précision et de chercher par tous les moyens à recueillir de l'information sur une recommandation en particulier.

Conséquences agronomiques et environnementales de la fertilisation

Sous les conditions humides qui règnent dans l'est de l'Amérique du Nord, la concentration d'azote minéral présente dans le sol est un indicateur fiable du risque de perte d'azote par lessivage ou dénitrification. Les concentrations de nitrates qui subsistent dans le sol après les récoltes augmentent considérablement quand les doses d'engrais sont supérieures aux quantités nécessaires à un rendement optimal. On le voit d'ailleurs clairement à la figure 6-7; à partir du moment où le rendement de la culture atteint un plateau, la teneur du sol en azote résiduel augmente.

FIGURE 6-7. Réaction de la tomate à la fertilisation azotée



Source : T.Q. Zhang, AAC, 2005.

Éléments nutritifs prélevés par la culture et enlevés par unité de rendement

Les prélèvements désignent les quantités maximales d'éléments nutritifs qu'une culture assimile pour les diffuser ensuite dans sa partie aérienne. L'enlèvement des éléments nutritifs renvoie à la quantité d'éléments nutritifs qui sont enlevés du champ au moment de la récolte. Dans les cultures qui sont récoltées comme plantes entières (maïs d'ensilage, luzerne et chou, par exemple), les quantités prélevées et les quantités enlevées sont presque identiques.

Les quantités indiquées aux tableaux 6-9 et 6-10 reposent sur les

données d'exploitation ontariennes disponibles et sur les données générales propres à l'Amérique du Nord, lorsque les données locales étaient insuffisantes. Pour prévoir avec précision les apports d'éléments nutritifs nécessaires à une culture, il faut demander une analyse des tissus végétaux.

Les données relatives aux cultures fourragères sont propres à l'Ontario et correspondent aux fourchettes observées dans les échantillons qui ont été soumis aux fins d'analyse à Agri-Food Laboratories à Guelph pendant cinq ans au début des années 1990.

Recommandations de fertilisation fondées sur l'analyse des tissus végétaux

L'analyse des tissus, des feuilles ou des plants peut servir :

- à préciser les besoins en éléments nutritifs de cultures vivaces établies, par exemple framboises et mûres, arbres fruitiers et vignes;
- à confirmer un diagnostic établi à partir de l'observation de symptômes de croissance inhabituelle afin de corriger la situation sans tarder.

Dans le cas des cultures vivaces où les analyses de sols se heurtent à la difficulté d'échantillonner la zone racinaire, les analyses des tissus végétaux sont souvent privilégiées. L'analyse des tissus végétaux permet en outre de savoir combien d'éléments nutritifs sont prélevés par la culture par comparaison à ceux qui sont biodisponibles dans le sol. Une analyse de sol occasionnelle reste utile dans les vergers et vignobles lorsqu'elle est accompagnée d'une analyse des tissus végétaux, notamment pour le contrôle du pH.

Au terme de nombreux essais sur le terrain, les recommandations ontariennes de fertilisation des cultures fruitières ont été basées sur des analyses des tissus végétaux. Ce type d'analyse est donc le principal facteur pris en compte dans la détermination des apports d'engrais en vue de la saison de croissance suivante.

Conjuguée à une analyse de sol, l'analyse des tissus végétaux permet de déceler les éléments nutritifs à surveiller ou faisant l'objet de carences. Malgré cet avantage, il n'est pas facile d'établir une recommandation de fertilisation sur la foi d'une analyse des tissus végétaux. En effet, ce type d'analyse risque de ne pas fournir à temps l'information nécessaire pour corriger un problème touchant des cultures annuelles dans la saison de croissance en cours.

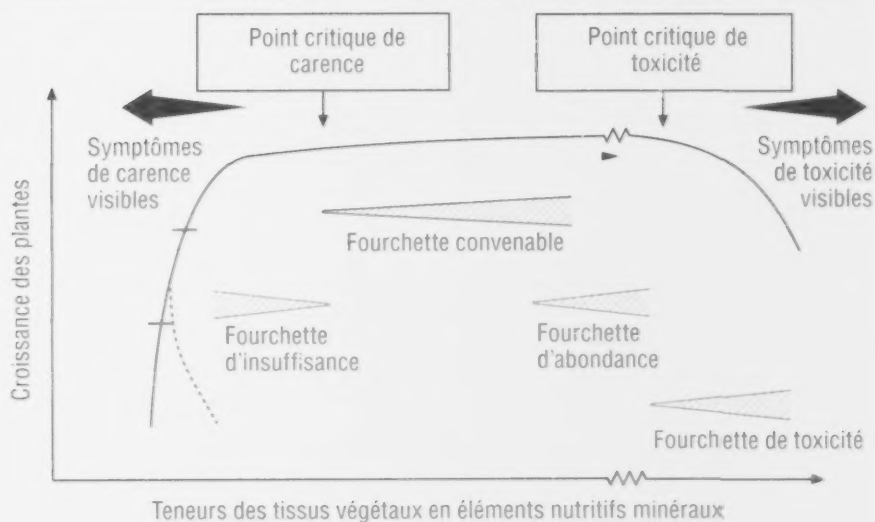
Concentrations insuffisantes, critiques et suffisantes

Dans une analyse des tissus végétaux, un élément nutritif est déclaré insuffisant quand sa concentration tombe sous un niveau critique pour telle partie de la plante et pour telle culture à un stade donné du développement de la plante. La figure 6-8 illustre la notion de point critique séparant les fourchettes insuffisantes et convenables.

Dans l'interprétation d'une analyse des tissus végétaux, le moment et stade de croissance où se fait l'échantillonnage, et la partie de la plante qui est échantillonnée revêtent une grande importance. Pour plus de détails sur l'analyse des tissus végétaux, se reporter au chapitre 1, p. 9-12.

Dans ses recommandations visant différentes cultures et ses guides destinés aux producteurs, le MAAARO précise des fourchettes de concentrations critiques d'éléments nutritifs pour la plupart des cultures pratiquées en Ontario.

FIGURE 6-8. Rapport entre la teneur en éléments nutritifs des tissus végétaux et la croissance des plantes



Source : Marschner, 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*.

Nombre de publications sur les grandes cultures et les cultures horticoles précisent aussi des valeurs critiques. La plupart des laboratoires qui font des analyses de tissus végétaux disposent de leur propre jeu de valeurs critiques, qui sont le fruit de leur expérience. Il est important de bien respecter les instructions du laboratoire en ce qui a trait à la partie des plantes qu'il faut échantillonner, au stade de croissance des plantes et à la manutention des échantillons.

Quand il s'agit de comprendre des singularités de la croissance

d'une culture, si le moment de l'échantillonnage ne correspond pas au stade de croissance pour lequel les valeurs critiques ont été établies, il faut ajouter aux échantillons prélevés dans la zone atteinte des échantillons témoins prélevés en même temps dans les zones saines. Voir la figure 1-7, p. 16.

Le tableau 6-8 présente les causes probables de concentrations excessives ou insuffisantes d'éléments nutritifs dans les échantillons de tissus végétaux. L'interprétation des résultats d'analyse est un exercice complexe.

TABEAU 6-8. Causes pouvant expliquer la surabondance ou l'insuffisance d'éléments nutritifs dans les tissus végétaux

Éléments nutritifs	Surabondance	Insuffisance
Tous	ralentissement de croissance dû à des conditions météorologiques (blessures par le froid, sécheresse), à des maladies ou à une carence en un autre élément nutritif	carence de l'élément nutritif dans le sol
Azote	application excessive d'azote provenant de fumier ou de sources commerciales, sol riche en matière organique, vitesses de minéralisation élevées	sol pauvre en matière organique, sol compacté, sol sec, sol gorgé d'eau propice à la dénitrification
Phosphore	sol fertile, teneur en zinc faible frôlant la carence, application de fortes doses de P	faible pH, ou pH du sol élevé, compactage du sol, sécheresse, sol froid, maladie des racines
Potassium	application de fortes doses, fortes concentrations dans le sol	apport excessif d'azote, compactage du sol, sol froid
Magnésium	vieille partie de la plante, application excessive d'un engrais à base de magnésium	faible pH, forte biodisponibilité du potassium, fortes concentrations d'azote
Calcium	vieille partie de la plante, feuille malade, contamination de l'échantillon avec du sol, les fortes concentrations de calcium étant rares	sol sableux soumis au lessivage, fortes concentrations de potassium dans des sols à faible CEC, forte biodisponibilité de l'azote, faible pH, doses de chaux inadéquates
Zinc	sol naturellement riche en zinc, épandage abondant de fumier de porcs, sol riche en matière organique, contamination par du matériel d'échantillonnage en métal galvanisé	pH du sol élevé, forte teneur en phosphore, zones de sol érodé, sol pauvre en matière organique
Manganèse	apports importants d'azote et de phosphore, pH faible, compactage du sol, sol peu oxygéné, contamination par des brouillards de pulvérisation, poussière	pH du sol élevé, sol très aéré, sol riche en matière organique
Cuivre	sol riche en cuivre, pulvérisation de produits cupriques (fongicides), éclaboussures de sol sur les feuilles	sol riche en matière organique, sol soumis au lessivage, sol riche en zinc et en manganèse
Fer	sol détrempé, présence de sol sur les feuilles, carence en zinc	excès de phosphore, de zinc, de cuivre et de manganèse
Bore	application de mauvaises doses, pH du sol faible	sol sableux soumis au lessivage, sol pauvre en matière organique
Soufre	application de fortes doses de soufre sulfate, résidus de pulvérisation foliaire sur les feuilles	application de doses excessives d'azote ou minéralisation rapide attribuable à la matière organique contenue dans le sol, pertes par lessivage
Molybdène	pH du sol élevé, résidus d'applications foliaires	pH du sol faible, forte concentration de phosphore, apports de soufre (antagonisme des ions au niveau des racines)

Système intégré de diagnostic et de recommandation (DRIS)

Au départ, le système DRIS a été conçu pour s'appliquer à la fois aux analyses de sols et aux analyses de tissus végétaux. En Amérique du Nord, on l'utilise plus souvent pour les analyses de tissus.

Le système compare des ensembles complets de concentrations d'éléments nutritifs et de ratios pour une culture en particulier à ceux des mêmes cultures pratiquées dans des conditions optimales à des niveaux de rendement atteignables maximaux. Les valeurs et ratios obtenus de ces cultures constituent les normes du DRIS.

Lorsque le système DRIS est appliqué à l'analyse des tissus végétaux, les éléments nutritifs essentiels sont classés les uns par rapport aux autres selon un ordre de carence décroissante. Dans certains cas, cette analyse a été jugée plus sensible que le point critique ou que la dose suffisante dans la détermination de la pertinence d'une dose accrue d'un ou de plusieurs éléments nutritifs. Comme le système DRIS fait appel à des ratios d'éléments nutritifs, la dilution de la matière sèche en raison de la maturation de la culture est réduite au minimum et le moment de l'échantillonnage a moins d'influence sur les résultats d'analyse.

Au départ, on croyait que les normes DRIS pouvaient s'appliquer à de grandes régions. Toutefois, d'après des études menées sur les principales cultures agronomiques, les

normes locales ou régionales sont plus précises pour diagnostiquer les carences. Même si le système DRIS n'est pas encore totalement fiable en ce qui a trait aux recommandations de fertilisation, il offre la possibilité de rassembler tous les éléments de la nutrition des plantes et de les évaluer simultanément avec le rendement dans le cadre du processus. Si l'on finit par disposer de données propices à une pondération adéquate, le système DRIS pourrait éventuellement être davantage utilisé.

Des recommandations de fertilisation et non des normes

Aucune table de recommandations ne peut couvrir toutes les situations. Une recommandation n'est pas une norme de production. Une recommandation, quelle qu'en soit la source, peut toujours être corrigée en fonction de l'expérience locale, de la connaissance des sols de la région et de la situation financière du producteur. Il est plus avisé d'apporter des ajustements de ce genre que de recourir aux recommandations générales.

Le fournisseur d'engrais chimiques est souvent bien placé pour connaître les particularités des sols, en raison des limites géographiques de distribution d'une usine de préparation des engrais. Voilà pourquoi chaque détaillant doit disposer d'au moins un agronome d'expérience ou d'un conseiller en culture compétent, capable de formuler des recommandations pertinentes.

TABLEAU 6-9. Prélèvement des éléments nutritifs par les grandes cultures et enlèvement des éléments nutritifs à leur récolte en Ontario

Culture	Rendement boiss./ac		N*	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S
			lb/ac					
Céréales, graines oléagineuses								
Maïs-grain	150	prélèvement	173-239	74-109	133-243	26-49	18-30	13-16
		enlèvement	97-149	55-66	39-44	1	13	10-11
Soya	50	prélèvement	230-290	40-50	120-220	25-30	20-25	17
		enlèvement	187-200	40-44	69-70	9-11	7-9	5
Blé d'automne	75	prélèvement	140-155	51-56	94-152	13	17-23	15-19
		enlèvement	86-94	41-47	26-28	2	12	6
Orge	75	prélèvement	93-112	36-41	75-112	17	8-13	13-15
		enlèvement	65-83	28-30	19-26	2	4	6
Avoine	75	prélèvement	70-86	30-33	89-109	9	10-15	14
		enlèvement	47-60	19	14-15	2	3	5
Seigle d'automne	50	prélèvement	83-84	28-42	50-120	13	7	14-15
		enlèvement	54-61	17-23	17-18	3	4	5-10
Haricots secs	30	enlèvement	75	25	25	2	2	5
Canola	45	prélèvement	135-144	59-75	107-120	**	**	27-28
		enlèvement	90-100	50-60	25-30	9-12	12-15	15
Cultures fourragères t imp. de MS/ac†								
Mais d'ensilage	8		173-239	74-109	133-243	26-49	18-30	13-16
Légumineuses d'ensilage mi-fané	5		266-367	53-79	224-354	113-177	19-36	19-20
Mélanges destinés à l'ensilage mi-fané	5		228-338	52-78	224-355	95-164	16-34	15-29
Graminées destinées à l'ensilage mi-fané	4		129-219	39-62	163-287	42-90	10-21	**
Foin de légumineu- ses, 1 ^{re} coupe	5		223-331	52-80	206-350	101-154	21-34	19-27
Foin mélangé, 1 ^{re} coupe	5		172-273	50-72	170-297	82-135	18-30	13-21
Foin de graminées 1 ^{re} coupe	4		103-181	35-56	111-224	42-85	11-21	11-16
Foin, 2 ^e coupe	3		152-215	34-47	119-191	68-102	14-23	11-17
* Le soya, les haricots secs, les légumineuses fourragères tirent la plus grande partie de leur azote de l'air.								
† Tonnes impériales de matière sèche/acre ** Données non disponibles								
Fourchettes de prélèvement et d'enlèvement d'éléments nutritifs correspondant aux niveaux de rendement types de grandes cultures bénéficiant de bonnes conditions de croissance. Les valeurs reposent dans la mesure du possible sur des données recueillies sur le terrain en Ontario ainsi que sur des estimations. Les quantités d'éléments nutritifs prélevés et enlevés varient en fonction du rendement de la culture. Les concentrations d'éléments nutritifs varient également selon l'année, la fertilité du sol et le cultivar choisi. Pour être précise, la planification de la gestion des éléments nutritifs exige une analyse annuelle de chaque culture. Les changements réels de fertilité du sol ne correspondent pas nécessairement aux quantités prélevées par la culture.								
Dans certains cas, la météorisation des matériaux du sol et de la matière organique peut compenser en partie la quantité d'éléments nutritifs prélevés par les cultures. Dans d'autres, les éléments nutritifs peuvent se lier chimiquement au sol ou être perdus par lessivage, de sorte que la quantité d'éléments nutritifs ainsi perdus peut être supérieure à la quantité prélevée par la culture.								

**TABLEAU 6-10. Prélèvement des éléments nutritifs par les cultures
horticoles et enlèvement des éléments nutritifs à leur récolte en Ontario**

Rendement t imp. / ac			N*	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S
			lb/ac					
Betterave à sucre	22	prélèvement	186-211	29-67	386-403	**	59	32-33
		enlèvement	88-92	11-40	143-183	**	**	13
Brocoli	4	prélèvement	133	8	165	**	**	**
		enlèvement	36	5	36	**	**	**
Carotte	25	prélèvement	145	25	345	**	**	**
		enlèvement	80	20	200	**	**	**
Chou	30	prélèvement	180-210	50-66	195-220	66	27	50-60
		enlèvement	120	24	215	66	27	50
Haricots verts	3	prélèvement	102	10-24	60-122	**	13	**
		enlèvement	17	3	34	**	**	**
Maïs sucré	6	prélèvement	155-187	20-63	105-181	**	27	15
		enlèvement	50	4	30	**	**	**
Oignon	20	prélèvement	120-145	25-53	105-155	30	9	20-36
		enlèvement	75	15	80-85	23	4-9	20-36
Petits pois	2	prélèvement	170-260	22-56	80-168	**	29	16
		enlèvement	40	2	30	**	**	**
Pomme de terre	15	prélèvement	160-170	50-55	220-330	**	30	15
		enlèvement	63	12	108-125	2,5	5	5-6
Tabac	1	prélèvement	84-110	17-30	170-171	**	16	13
		enlèvement	56-75	4-6	104-120	75	18	14
Tomate	40	prélèvement	232	87	463	**	36	54
		enlèvement	144-160	24	280-288	14-24	22-24	28
Pêche	15	prélèvement	50	20	60	11	**	**
Pomme	20	prélèvement	165	75	300	**	40	**
Raisin	6	prélèvement	51	18	80	**	9	**

Fourchettes de prélèvement et d'enlèvement d'éléments nutritifs correspondant aux niveaux de rendement types des cultures horticoles bénéficiant de bonnes conditions de croissance.

* Les légumineuses comme les haricots et les pois tirent la plus grande partie de leur azote de l'air.

** Données non disponibles.

Bibliographie

Black, Charles A. 1993. *Soil Fertility Evaluation and Control*. Lewis Publishers, Boca Raton.

Foth, H.D. et B.G. Ellis. 1996. *Soil Fertility*. 2nd ed. CRC Press, Inc.

Kachanoski, R.G. et G.L. Fairchild. 1994. « Field scale fertilizer recommendations and spatial variability of soil test values » dans *Better Crops*, 78(4):20-23.

Marschner, H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. San Diego, California: Academic Press, Inc.

Reid, W.S. 1996. « Influence of lime and calcium:magnesium ratio on alfalfa and birdsfoot trefoil yields » dans *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 27: 1885-1900.

Reetz, H.F. Jr. et P.E. Fixen.(Reetz et Fixen). « Economics of long-term and short-term soil fertility management » dans *Better Crops*, 76(2):8-11.

Richards, J.E., Bates, T.E. et Sheppard, S.C. 1995. « Changes in the form and distribution of soil phosphorus due to long-term corn production » dans *Can. J. Soil Sci.*, 75:311-318.

Stevenson, C.K. 1983. »Maximum yield research progress at Ridgetown College in Ontario » dans *Better Crops* 68 (1):4-5.

Stevenson, C.K. et M.C. MacAlpine. 1996. *Penicillium bilaii phosphorus research with corn*. Report No. 51, Ridgetown College of Agricultural Technology.



7 INGRÉDIENTS, MÉLANGES ET APPLICATION DES ENGRAIS

Engrais

Quel que soit l'engrais, la nature de ses constituants, la façon dont ceux-ci sont mélangés et la méthode d'application utilisée auront une grande influence sur le programme de fertilisation. La plupart des engrais utilisés en Ontario se présentent sous forme de granulés, mais ils viennent aussi sous forme gazeuse ou liquide. Tous ces produits sont décrits ci-dessous et énumérés dans le tableau 7-1, qui précise de plus leur formulation (% de $N-P_2O_5-K_2O$ en poids) ainsi que leurs caractéristiques chimiques, de manutention et d'utilisation.

Environ 70 % des éléments nutritifs minéraux épandus sur les champs en Ontario sont sous forme de granulés. Ils sont en général plus concentrés que les engrais liquides et relativement moins coûteux. Les exigences d'entreposage, de manutention et de transport qui s'appliquent à ces engrais sont différentes de celles qui s'appliquent aux engrais liquides ou gazeux. Les granulés peuvent être mélangés entre eux de façon à obtenir une formulation composée adaptée aux besoins des cultures.

En règle générale, les engrais liquides ont un coût de revient plus élevé par unité d'élément nutritif que les granulés en raison du poids et du volume supplémentaires qu'il faut transporter et, dans certains

cas, en raison des traitements supplémentaires qu'ils doivent subir. En contrepartie, les engrais liquides se prêtent au pompage et sont faciles à mesurer et à mettre en place avec précision. Voir le tableau 7-1, p. 182.

En 2006, pour une même teneur en éléments nutritifs, l'engrais 10-34-0 coûtait 54 % plus cher que l'engrais sous forme de phosphate diammonique. L'écart est encore plus grand dans le cas des engrais complets N-P-K, où les liquides peuvent coûter deux fois plus cher que leur équivalent en granulés.

Sources d'azote (N)

Urée (46-0-0)

- produit blanc; $CO(NH_2)_2$;
- produit synthétique obtenu à partir d'ammoniac et de dioxyde de carbone;
- source d'engrais azoté la plus couramment utilisée dans le monde entier;
- peut contenir de petites quantités (0,5-1,5 %) de biuret, environ 0,3 % d'un agent de conditionnement (formaldéhyde ou méthylène diurée) et moins de 0,5 % d'eau;
- les formulations destinées aux applications foliaires devraient renfermer moins de biuret.

L'urée se convertit en azote ammoniacal dans le sol. L'urée se

convertit en azote ammoniacal dans le sol. L'uréase, une enzyme présente dans les sols, les bactéries et les résidus de cultures, accélère la conversion. L'urée épandue à la surface du sol est sujette aux pertes d'ammoniac. Les pertes augmentent avec le pH du sol, la quantité de résidus et l'élévation des températures.

Nitrate d'ammonium (34-0-0)

- NH_4NO_3 ;
- produit de la combinaison de l'ammoniac et de l'acide nitrique;
- peut contenir environ 1 % d'un agent de conditionnement et 0,5 % d'eau;
- coûte plus cher par unité d'azote que l'urée;
- n'est plus produit au Canada;
- des règlements s'appliquent à son transport (classe 5.1 en vertu du *Règlement sur le transport des marchandises dangereuses*);
- à conserver loin des huiles et autres matières inflammables, car il peut former un mélange explosif;
- plus hygroscopique que l'urée, peut se détériorer pendant l'entreposage, par temps très chaud, à mesure que les changements dans la phase cristalline entraînent la dégradation des sphérules.

Lorsqu'il est appliqué sur le sol, le nitrate d'ammonium se dissout dans l'eau du sol et libère de l'ammonium et du nitrate, l'un et l'autre pouvant être prélevés par les plantes. Il devient assimilable un peu plus

rapidement que l'urée à basses températures, mais dans les conditions de culturales normales, il n'y a pratiquement pas de différence.

Nitrate d'ammonium et de calcium (27-0-0)

- mélange uniforme renfermant 80 % de nitrate d'ammonium et soit de la chaux calcitique, soit de la chaux dolomitique;
- la chaux réduit les risques d'explosion.

Quand il est épandu avec une quantité de N équivalente en poids, le nitrate d'ammonium et de calcium est semblable au nitrate d'ammonium. La chaux présente dans les granulés équilibre en partie l'acidité libérée par l'azote, de sorte que ce produit n'acidifie pas le sol aussi rapidement que ne le fait le nitrate d'ammonium.

Solution de nitrate d'ammonium et d'urée (NAU) (de 28-0-0 à 32-0-0)

- produit de la dissolution de l'urée et du nitrate d'ammonium (50:50) dans l'eau;
- la formulation 28-0-0 peut former un précipité si la température baisse sous les -18°C (0°F);
- il existe une solution plus concentrée (32-0-0), mais elle est rarement utilisée en Ontario, car un précipité se forme dès 0°C (32°F);
- comme l'urée, la NAU est sujet aux pertes d'ammoniac s'il est appliquée à la surface du sol;
- on y ajoute souvent des herbicides et autres pesticides

destinés à des épandages en pleine surface;

- ne doit pas entrer en contact avec le feuillage, sous peine de le brûler gravement;
- se prête aux épandages en bandes latérales.

La NAU est l'engrais liquide offert sur le marché qui est le plus couramment utilisé en Ontario.

Ammoniac anhydre (82-0-0)

- NH_3 ;
- produit issu de la réaction du gaz naturel avec l'azote atmosphérique sous des températures et des pressions élevées;
- gaz incolore dégageant une odeur âcre à la pression atmosphérique;
- se manipule comme un liquide sous pression; à -2°C (28°F), la pression est la même que celle de l'air ambiant; à 16°C (60°F), elle est de 655 kPa (93 lb/po²);
- constituant de tous les engrais azotés offerts sur le marché;
- effet acidifiant semblable à celui de la NAU (1,8 lb de CaCO_3 nécessaire pour neutraliser l'acidité générée par chaque livre de N fournie).

L'ammoniac anhydre est appliqué directement par injection dans le sol où il se vaporise et se dissout dans l'eau du sol. Pour éviter les pertes par vaporisation dans l'air, la bande d'ammoniac anhydre doit être placée à une profondeur suffisante dans le sol afin qu'elle puisse être complètement emprisonnée dans le

sol lors de la fermeture de la fente ouverte par l'injecteur.

L'emploi de l'ammoniac anhydre soulève des craintes quant à son innocuité pour les organismes terricoles. À l'intérieur de la bande d'injection, le pH du sol élevé et les conditions hygroscopiques suffisent à tuer les vers de terre et autres représentants de la faune et de la microflore du sol, mais cette zone est relativement petite et le produit se dissipe rapidement. Les populations d'organismes terricoles se rétablissent rapidement et augmentent même par suite de l'ajout d'azote dans l'écosystème du sol.

Petits nuages de vapeur

Vous êtes-vous déjà demandé d'où venaient les petits nuages de vapeur qui apparaissent derrière l'épandeur d'ammoniac anhydre?

À la vue de ces petits nuages, bien des producteurs craignent d'être en train de perdre de grandes quantités d'engrais azoté. En fait, ce qu'ils voient est un brouillard créé par le gaz ammoniac froid qui condense la vapeur d'eau. On estime que chaque millilitre d'ammoniac peut produire plus de un litre de brouillard. En moyenne, les pertes attribuables à ce changement de phase ne sont que de 4 % et sont moins grandes encore sous de bonnes conditions.

TABLEAU 7-1. Ingrédients courants des engrais

TABLEAU 7-1. Ingrédients courants des engrais							
	For- mule ¹ (%)	Autres éléments nutritifs ²	Indice de salinité ³	Équivalent de CaCO ₃ ⁴ (lb/lb de N)	Densité apparente ⁵		Coût relatif/ unité d'élément nutritif ⁶
					lb/ pi ³	kg/L	
GRANULÉS							
Urée	46-0-0		74	1,8	50	0,80	1,00
Nitrate d'ammonium	34-0-0		104	1,8	56	0,90	1,42
Nitrate d'ammonium et de calcium	27-0-0	4-6 % Ca 0-2 % Mg	93	0,9	68	1,10	1,46
Sulfate d'ammonium	21-0-0	24 % S	88	3,6	68	1,10	1,41-2,04
Nitrate de calcium	15-0-0	19 % Ca	65	-1,3 (B)	75	1,20	3,72
Nitrate de potassium	12-0-44		70	-1,9 (B)	75	1,20	2,54
Nitrate de sodium	16-0-0		100	-1,8 (B)	78	1,25	n.d.
Superphosphate simple	0-20-0	20 % Ca 12 % S	8	neutre	68	1,10	1,77
Superphosphate triple	0-46-0	21 % Ca	10	neutre	68	1,10	1,00
Phosphate monoammonique	11-52-0		27	5,4	62	1,00	0,82
Phosphate diammonique	18-46-0		29	3,6	62	1,00	0,81
Chlorure de potassium (rouge)	0-0-60	45 % Cl	115	neutre	70	1,10	1,00
Chlorure de potassium (blanc)	0-0-62	46 % Cl	116	neutre	75	1,20	1,00
Sulfate de potassium	0-0-50	18 % S	43	neutre	75	1,20	2,34
Sulfate de potassium-magnésium	0-0-22	20 % S 11 % Mg	43	neutre	94	1,50	3,71
LIQUIDES							
Ammoniac anhydre	82-0-0		47	1,8	37	0,6	0,83
Solution de nitrate d'ammonium et d'urée	28-0-0 32-0-0		63 71	1,8	80 82	1,28 1,32	1,10
Solution de polyphosphate d'ammonium	10-34-0 11-37-0		20	3,6	87	1,40	1,27

¹ Formule : concentration minimale garantie en poids d'azote total, d'acide phosphorique biodisponible (P₂O₅) et de potasse soluble (K₂O) dans chaque engrais.

² Autres éléments nutritifs : éléments nutritifs autres que N, P ou K.

³ Indice de salinité : comparaison des solubilités relatives des composés de fertilisation avec le nitrate de sodium (100) en poids de matière. S'ils sont appliqués trop près de la semence ou du feuillage et qu'ils possèdent un indice de salinité élevé, ils risquent davantage de causer des dommages.

⁴ Équivalent de CaCO₃ : livres de chaux nécessaires pour neutraliser l'acide formé par une livre de N fournie par l'engrais. La lettre « B » suivant l'indice de chaulage indique un ingrédient alcalin ou basique (neutralisateur d'acide). Nota : Les effets acidifiants peuvent être jusqu'à deux fois plus élevés que ce qui est indiqué, selon les prélèvements qui sont faits par les végétaux.

⁵ Densité apparente : exprimée en livres par pied cube ou en kg/L, il s'agit d'une donnée importante puisque les semoirs et les épandeurs mesurent les engrais en volume plutôt qu'en masse.

⁶ Coût relatif/unité : d'après les prix de 2006 de l'urée pour le N, du superphosphate triple pour le P, et du chlorure de potassium pour le K.

¹ Formule : concentration minimale garantie en poids d'azote total, d'acide phosphorique biodisponible (P₂O₅) et de potasse soluble (K₂O) dans chaque engrais.

² Autres éléments nutritifs : éléments nutritifs autres que N, P ou K.

³ Indice de salinité : comparaison des solubilités relatives des composés de fertilisation avec le nitrate de sodium (100) en poids de matière. S'ils sont appliqués trop près de la semence ou du feuillage et qu'ils possèdent un indice de salinité élevé, ils risquent davantage de causer des dommages.

⁴ Équivalent de CaCO₃ : livres de chaux nécessaires pour neutraliser l'acide formé par une livre de N fournie par l'engrais. La lettre « B » suivant l'indice de chaulage indique un ingrédient alcalin ou basique (neutralisateur d'acide). Nota : Les effets acidifiants peuvent être jusqu'à deux fois plus élevés que ce qui est indiqué, selon les prélèvements qui sont faits par les végétaux.

⁵ Densité apparente : exprimée en livres par pied cube ou en kg/L, il s'agit d'une donnée importante puisque les semoirs et les épandeurs mesurent les engrais en volume plutôt qu'en masse.

⁶ Coût relatif/unité : d'après les prix de 2006 de l'urée pour le N, du superphosphate triple pour le P, et du chlorure de potassium pour le K.

Sulfate d'ammonium (21-0-0)

- $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$;
- sous-produit industriel cristallin allant du blanc au brun, obtenu par la neutralisation de l'ammoniac dégagé par les fours à coke en présence d'acide sulfurique recyclé, ou issu de la fabrication du nylon;
- peut contenir environ 0,5 % d'eau et d'infimes quantités d'éléments nutritifs tels que potassium, calcium, cuivre, fer, manganèse et zinc;
- revient en général plus cher par unité de N que l'urée.

Le sulfate d'ammonium se décompose en ammonium et en sulfate lorsqu'il est dissous dans l'eau du sol. Il est utile aux épandages en pleine surface, car il comporte moins de risques de volatilisation de l'ammoniac. Selon la source, il est sous forme de granulés ou d'une poudre grossière.

Nitrate de calcium (15-0-0)

- $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$;
- source d'azote coûteuse;
- utilisé uniquement quand des apports de calcium et d'azote sont nécessaires et qu'il faut éviter l'acidification du sol;
- renferme de l'azote sous forme de nitrate et du calcium hydrosolubles;
- fortement hygroscopique, peut se liquéfier totalement s'il est exposé à l'air sous une humidité relative supérieure à 47 %. Entreposer tout sac ouvert dans un contenant étanche à l'eau hermétiquement fermé.

Hautement solubles, le calcium et l'azote des nitrates sont immédiatement assimilables par les plantes.

Nitrate de potassium (12-0-44)

- KNO_3 ;
- extrait des lacs salés asséchés (comme la Mer Morte) ou issu de la réaction du chlorure de potassium et de l'acide nitrique;
- source coûteuse de N et de K;
- surtout utilisé dans les cultures horticoles, du tabac ou hydroponiques.

Sources de phosphore (P)

Superphosphate simple (0-20-0)

- constitué à environ moitié-moitié de phosphate monocalcique et de gypse $[\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$;
- issu de la réaction de roches phosphatées avec de l'acide sulfurique;
- contient habituellement 20 % de phosphate assimilable, 12 % de soufre et 20 % de calcium.

Il s'agit de l'engrais commercial le plus ancien, puisque le superphosphate simple est sur le marché depuis 1840. Les principaux fournisseurs d'engrais en Ontario n'offrent plus ce produit, qui est maintenant largement remplacé par le superphosphate triple.

Superphosphate triple (0-46-0)

- constitué essentiellement de phosphate monocalcique [$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$];
- issu de la réaction de roches phosphatées avec de l'acide phosphorique;
- renferme environ 83 % de phosphate monocalcique, 2 % d'eau, le reste étant surtout des roches phosphatées qui n'ont pas réagi et d'autres phosphates insolubles.

Le phosphate monocalcique est un sel acide qui décompose l'urée assez facilement. On ne doit donc pas le mélanger à de l'urée.

Phosphate monoammonique (PMA; 11-52-0)

- $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$;
- issu de la réaction de l'ammoniac anhydre avec de l'acide phosphorique;
- couleur allant du blanc cassé au gris;
- renferme habituellement 85 % du composé chimique pur, de 3 à 5 % de phosphate diammonique, 1 % d'eau, le reste étant constitué de magnésium, de sulfates et d'autres phosphates;
- source économique de N (10–12,5 %) et de P_2O_5 (48–52 %).

Le phosphate monoammonique est la source de P privilégiée en Ontario en raison de sa grande valeur fertilisante et de son innocuité relative pour les cultures lorsqu'il est utilisé dans les engrais de démarrage. Il convient bien aux

épandages en bandes au départ des cultures.

Phosphate diammonique (PDA; 18-46-0)

- $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$;
- issu de la réaction de l'ammoniac anhydre et de l'acide phosphorique;
- coût unitaire relativement faible;
- couleur allant du gris pâle au gris foncé;
- renferme habituellement environ 80 % du composé chimique pur, 10 % de phosphate monoammonique, de 1–2 % d'eau, le reste étant constitué de magnésium, de sulfates et d'autres phosphates. Peut également contenir une petite quantité de nitrate d'ammonium ou d'urée ajoutée pendant la fabrication pour relever la teneur en azote jusqu'à la concentration garantie, soit 18 %;
- renferme de l'azote à 100 % hydrosoluble et du phosphate assimilable habituellement à 90 % hydrosoluble.

Le phosphate diammonique est la principale source de P depuis plusieurs décennies en raison de son faible coût et de sa forte valeur fertilisante. Il n'est toutefois pas toujours le choix le plus indiqué en raison des risques de dommages par l'ammoniac qu'il comporte pour les cultures lorsqu'il est utilisé comme engrais de démarrage, particulièrement dans les sols alcalins.

Solution de polyphosphate d'ammonium

- $(\text{NH}_4)_3\text{HP}_2\text{O}_7$;
- solution offrant une composition de 10-34-0 (parfois de 11-37-0);
- renferme du P à environ 75 % sous forme de polyphosphate et à 25 % d'orthophosphate;
- issue de la réaction de l'ammoniac avec de l'acide pyrophosphorique, lequel est obtenu par déshydratation de l'acide phosphorique;
- possède un pH de 6, donc presque neutre;
- se mélange bien avec la NAU.

La formule de 10-34-0 se mélange également bien avec des oligo-éléments. Par exemple, elle permet de maintenir une concentration de 2 % de Zn dans la solution comparativement à 0,05 % avec le H_3PO_4 .

Phosphate naturel

- roche sédimentaire constituée essentiellement de fluoro-phosphate de calcium avec impuretés de fer, d'aluminium et de magnésium;
- matière première servant à la fabrication des engrais phosphorés;
- parfois présenté comme étant une source « naturelle » de P;
- le P qu'il renferme n'est pas du tout hydrosoluble;
- de 5 à 17 % du P qu'il contient est soluble dans le citrate;
- s'il est finement moulu, il peut apporter suffisamment de P biodisponible dans les sols à faible pH (acides) lorsqu'il est

appliqué à raison de 2 à 3 fois les doses de superphosphates;

- biodisponibilité de faible à nulle dans les sols neutres ou alcalins.

Sources de potassium (K)

Chlorure de potassium (0-0-60 ou 0-0-62)

- symbole chimique : KCl;
- source la plus courante et la moins coûteuse de K;
- contient du chlore (47 %), un élément nutritif essentiel pour les plantes, nécessaire à la division cellulaire, à la photosynthèse et à la suppression des maladies;
- souvent livré avec une petite quantité (moins de 100 grammes par tonne) d'un agent anti-agglomérant à base d'amines ou de pétrole;
- biodisponibilité du K identique pour les formes rouge et blanche.

Chlorure de potassium rouge (0-0-60)

- produit extrait des mines de la Saskatchewan surtout, mais dans une certaine mesure aussi de celles du Nouveau-Brunswick;
- renferme environ 97 % de chlorure de potassium (KCl);
- couleur attribuable aux impuretés de fer; n'influence pas la solubilité.

Chlorure de potassium blanc (0-0-62)

- obtenu par cristallisation du chlorure de potassium issu de l'extraction de la potasse par dissolution;
- chlorure de potassium presque pur.

Sulfate de potassium (0-0-50)

- K_2SO_4 ;
- extrait de l'eau saumâtre du Grand Lac Salé de l'Utah;
- contient aussi 17 % de soufre sous forme hydrosoluble.

Par rapport au chlorure de potassium, le sulfate de potassium, ou sulfate de potasse, possède un indice de salinité plus faible et coûte plus cher. Il est surtout utilisé sur des cultures sensibles au chlorure, comme le tabac, la pomme de terre, les arbres fruitiers et certains légumes.

Sulfate de potassium-magnésium (0-0-22)

- sulfate de potassium-magnésium $K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$;
- extrait de gisements au Nouveau-Mexique;
- communément désigné K-Mag et Sul-Po-Mag.

Le sulfate de potassium-magnésium coûte plus cher l'unité de K que le chlorure de potassium. Il contient également 11 % de magnésium et 22 % de soufre sous une forme hydrosoluble et donc immédiatement assimilable par les plantes. Il est utile comme source de magnésium soluble dans les champs où le chaulage n'est pas nécessaire.

Solutions claires

- disponibilité sur le marché d'un large éventail d'engrais à base de N-P et N-P-K à pH neutre (voir le tableau 7-2);
- engrais à base de polyphosphate d'ammonium (10-34-0);
- fabriquées par l'ajout au polyphosphate d'ammonium, d'urée, d'ammoniaque, d'acide phosphorique, de chlorure de potassium ou d'hydroxyde de potassium;
- possibilité d'y ajouter des oligo-éléments, pourvu qu'ils soient sous forme de chélates;
- tous les ingrédients doivent être de haute qualité, puisque les impuretés peuvent provoquer le relargage (précipitation en sel) ou la gélification de la solution;
- produit généralement de grande qualité agronomique, bien que les dommages causés par le sel aux semences et aux racines soient à craindre quand les doses de N et de K augmentent;
- utilisées le plus couramment comme engrais de démarrage dans la raie de semis;
- réduction de temps et de main-d'œuvre au moment des semis en raison des faibles doses et de la possibilité de pomper le produit de la citerne au semoir;
- possibilité de réduire les coûts au chapitre du matériel utilisé pour les semis du fait qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser un organe ouvreuse distinct pour l'engrais.

TABLEAU 7-2. Mélanges d'engrais liquides

Formule	Poids/ gal US (lb)	Poids/ gal imp. (lb)	Poids/ litre (lb)	Gal imp./ tonne	Gal US/ tonne	Litre/ tonne
8-25-3	11,11	13,35	2,94	165,1	198,4	749,9
6-18-6	10,69	12,85	2,83	171,6	206,2	779,0
3-11-11	10,45	12,55	2,76	175,7	211,0	798,8
9-9-9	10,49	12,60	2,77	175,0	210,2	795,9
7-7-7	10,41	12,50	2,75	176,4	211,8	801,7
6-24-6	11,07	13,30	2,93	165,8	199,2	752,4
9-18-9	11,07	13,30	2,92	165,8	199,2	755,0
5-10-15	10,70	12,85	2,83	171,6	206,0	799,0
2-10-15	10,62	12,75	2,81	172,9	207,6	784,6
10-34-0	11,60	14,00	3,09	157,0	188,5	715,8
1 gallon impérial = 1,201 gallon US 1 gallon US = 3,785 litres				1 gallon US = 0,8326 gallon impérial 1 gallon impérial = 4,546 litres		

Solutions acides

- combinaisons d'acide phosphorique, d'acide sulfurique et d'urée;
- possibilité d'ajouter des oligo-éléments qui ne sont pas sous forme de chélates.

Les solutions acides ne sont pas très répandues en Ontario parce qu'elles sont corrosives et coûteuses comparativement aux engrais granulaires. Ces solutions sont mises de l'avant en partant du principe que les éléments nutritifs sont plus assimilables aux pH faibles qu'on trouve dans la bande de fertilisation, particulièrement dans les sols alcalins.

La plupart des sols sont toutefois suffisamment tamponnés pour que l'ajout d'acide n'ait aucun effet sur le pH du sol. Ces produits sont aussi

bons, mais pas meilleurs, que les autres engrais sur le plan de la bio-disponibilité des éléments nutritifs.

Suspensions

- produites par le mélange d'ingrédients secs finement moulus avec de l'eau et un dispersant, par exemple l'argile;
- peuvent donner un engrais complet plus concentré que les engrais dissous;
- nécessitent d'agiter le mélange pour le maintenir en suspension et de recourir à du matériel spécial pour la manutention et l'épandage.

Les suspensions constituent une partie quasi-négligeable du marché ontarien des engrais, même s'ils sont d'emploi courant dans l'Ouest canadien.

Sources d'éléments nutritifs secondaires

En Ontario, il arrive que les sols aient besoin d'éléments nutritifs secondaires. Le cas échéant, ils peuvent être ajoutés à un mélange d'engrais ou à la chaux destinée à corriger l'acidité du sol. Le tableau 7-3 présente les sources les plus courantes d'éléments nutritifs secondaires et d'oligo-éléments.

Calcium

La chaux (calcitique ou dolomitique) est la source de calcium plus répandue. Elle amène une élévation du pH des sols acides. Pour être efficace, elle doit être finement broyée. La chaux se vend en poudre ou en granulés obtenus à partir de chaux finement broyée. La solubilité de la chaux chute rapidement à mesure que le pH du sol augmente.

Dans les sols neutres ou alcalins, le gypse (sulfate de calcium) est l'amendement calcaire à privilégier, car il est plus soluble que la chaux. Le gypse n'a aucun effet sur le pH du sol.

Le chlorure de calcium ou le nitrate de calcium servent occasionnellement de sources de calcium pour les pulvérisations foliaires.

Magnésium

Les carences en magnésium s'observent surtout dans les sols acides. Les apports de chaux dolomitique destinés à corriger l'acidité du sol renferment suffisamment de magnésium pour corriger la carence. La chaux dolomitique ne convient pas aux sols alcalins du fait que sa solubilité

décroît avec l'augmentation du pH du sol.

Dans les sols neutres ou alcalins, les sels d'Epsom (sulfate de magnésium) ou le sulfate de potassium-magnésium peuvent servir à enrichir le sol de magnésium.

Soufre

Le soufre, sous forme de sulfate, est présent dans un certain nombre d'engrais courants. On peut aussi l'ajouter à un mélange d'engrais. On utilise alors le plus souvent les ingrédients suivants : sulfate d'ammonium, sulfate de potassium et sulfate de potassium-magnésium. Le gypse (sulfate de calcium) peut aussi servir de source de soufre. La disponibilité du produit, les frais de transport et les autres éléments nutritifs nécessaires à la culture détermineront la source de soufre la plus économique.

Le soufre élémentaire granulaire (90 % de S) peut être une autre source de cet élément. Il amène lui aussi une acidification du sol. Le soufre doit être oxydé et transformé en sulfate pour être assimilable par les cultures, ce qui peut prendre plusieurs mois. Comme certains des produits intermédiaires du processus d'oxydation peuvent être toxiques pour les cultures, les épandages de fortes doses doivent se faire en pleine surface plutôt qu'en bandes.

**TABLEAU 7-3. Sources courantes d'éléments
nutritifs secondaires et d'oligo-éléments**

Élément nutritif	Source	Teneur	Autres éléments nutritifs	Application	
				Au sol	Fo- liaire
Calcium (Ca)	chaux calcitique	22-40 %		*	
	chaux dolomitique	16-22 %	6-13 % Mg	*	
	gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	23 %	19 % S	*	
	chlorure de calcium (CaCl_2)	36 %	64 % Cl	*	*
	nitrate de calcium ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$)	19 %	15,5 % N	*	*
	chaux granulaire	16-40 %	0-13 % Mg	*	
	poussière de four à ciment	26-32 %	2-9 % K_2O	*	
Magnésium (Mg)	chaux dolomitique	6-13 %	16-22 % Ca	*	
	sels d'Epsom (MgSO_4)	9 %	13 % S	*	*
	sulfate de potassium- magnésium	11 %	22 % K_2O 20 % S	*	
Soufre (S)	sulfate d'ammonium	24 %	21 % N	*	
	sulfate de potassium	18 %	50 % K_2O	*	
	sulfate de potassium- magnésium	22 %	22 % K_2O ; 11 % Mg	*	
	sulfate de calcium	19 %	23 % Ca	*	
	soufre granulaire	90 %			
Bore (B)	divers produits granulaires	12-15 %		*	
	Solubor	20 %			*
Cuivre (Cu)	sulfate de cuivre	25 %		*	
	chélates de cuivre	5-13 %			
Manganèse (Mn)	sulfate de manganèse	28-32 %			*
	chélates de manganèse	5-12 %			*
Molybdène (Mo)	molybdate de sodium	39 %			*
Zinc (Zn)	sulfate de zinc	36 %		*	*
	oxysulfate de zinc	8-36 %		*	
	chélates de zinc	9-14 %			*

Sources d'oligo-éléments

Puisque les quantités d'oligo-éléments nécessaires et appliquées sont relativement petites, il est important que les applications soient uniformes. Les principales catégories de produits contenant des oligo-éléments sont des granulés destinés à être mélangés à des engrais granulaires, et des liquides ou des poudres solubles destinés aux applications foliaires. La forme à privilégier dépend de l'élément nutritif spécifique ainsi que de la culture et des conditions du sol.

Les oligo-éléments granulaires sont mélangés à d'autres ingrédients des engrais en vue d'être épandus en pleine surface ou de servir d'engrais de démarrage. La compatibilité avec les autres ingrédients est importante, tant sur le plan chimique que sur celui de la granulométrie. Comme nombre d'oligo-éléments sont phytotoxiques en trop grande quantité, il faut éviter la ségrégation des constituants des mélanges.

Oxysulfates

- les oxysulfates sont des combinaisons des formes oxyde et sulfate de l'oligo-élément;
- les sulfates sont beaucoup plus solubles et plus assimilables que les oxydes;
- les oxydes sont beaucoup plus stables dans un produit mélangé;
- les oxydes ne sont que lentement assimilables par les cultures.

Ces produits perdent de leur popularité, car leur biodisponibilité et les gains de rendement qu'ils procurent ne sont pas constants.

Sulfates

- assez solubles;
- tendent à être hygroscopiques et peuvent provoquer des problèmes d'agglutination s'ils sont mélangés à d'autres ingrédients fertilisants.

Malgré ces réserves, leur biodisponibilité constante explique leur présence fréquente dans les mélanges d'engrais.

Oligo-éléments liquides et solubles

Ces produits peuvent être mélangés avec de l'eau et pulvérisés sur le feuillage ou incorporés à des engrais liquides utilisés comme engrais de démarrage.

Chélates

- molécules organiques complexes qui se lient à des ions métalliques et les maintiennent ainsi sous des formes solubles alors qu'ils devraient normalement réagir avec d'autres minéraux pour former des composés insolubles;
- la chélation permet à nombre de ces éléments nutritifs d'être mélangés avec des engrais liquides sans former de précipités insolubles;
- peuvent augmenter la biodisponibilité des éléments nutritifs dans le sol;

- les agents chélateurs les plus souvent utilisés sont l'EDTA et le DTPA;
- d'autres substances organiques (acides humiques, lignosulfonates, glucoheptonates) peuvent se lier à des ions métalliques, mais pas aussi étroitement que les vrais chélates.

Les chélates sont beaucoup plus coûteux que les autres formes solubles d'oligo-éléments. On doit les utiliser avec prudence puisqu'ils peuvent complexifier les minéraux déjà présents dans le sol et aggraver des carences.

Poudres solubles

- la forme d'oligo-éléments destinés aux pulvérisations foliaires la moins coûteuse et celle qui offre la fiabilité la plus constante;
- la plupart de ces poudres exigent un pulvérisateur à même de fournir une bonne agitation de manière à maintenir la poudre en solution;
- il faut un mouillant-adhésif pour que l'élément nutritif passe à travers la cuticule et pénètre dans la feuille.

Produits destinés à améliorer l'efficacité des engrais

Azote

La plupart des produits conçus pour améliorer l'efficacité du prélèvement de l'azote retardent la libération de ses formes solubles, l'ammonium et les nitrates. Ces produits sont

de plus en plus utilisés. Selon Hall (2005), les ventes de ces engrais se seraient établies à 120 000 tonnes d'azote en 2003, ce qui représente 1 % du marché total nord-américain des engrais azotés.

Ces produits entrent dans une ou plusieurs des catégories suivantes :

- **Engrais à libération lente ou contrôlée.** Engrais qui contiennent de l'azote sous une forme qui en retarde la biodisponibilité, de sorte que l'azote est assimilable sur une plus longue période que lorsqu'il provient d'engrais ordinaires à base d'ammonium, de nitrates ou d'urée. La libération lente de l'azote peut être obtenue par différents procédés, notamment par des revêtements de polymère ou de soufre, par des occlusions ou par l'incorporation de l'azote dans des composés qui sont insolubles ou qui doivent d'abord être minéralisés avant de libérer l'azote. Voici des exemples : ESN® Polymer Coated Urea 44-0-0, DURATION CR®, Multicote®, NUTRI-PAK®, Osmocote® ou POLYON® Coated Urea. Certains de ces produits sont offerts en différentes formulations qui s'assortissent de vitesses de libération variables. Chaque produit est toutefois conçu pour une application particulière et une culture précise.
- **Inhibiteurs de l'uréase.** Substances qui inhibent l'action hydrolytique exercée par l'enzyme uréase sur l'urée.

L'Agrotain®, qui renferme du N-triamide de l'acide thiophosphorique (NBPT) en est un exemple.

- **Inhibiteurs de la nitrification.** Substances qui inhibent l'oxydation biologique de l'ammonium en nitrate. Le N-Serve® (nitrapyrine) et le DCD (dicyandiamide) en sont des exemples. Le thiosulfate d'ammonium inhibe aussi jusqu'à un certain point la nitrification.
- **Engrais stabilisés.** Un stabilisateur d'azote est une substance qu'on ajoute à un engrais et qui a pour effet de prolonger la période pendant laquelle l'engrais reste sous forme d'urée ou sous forme ammoniacale. Le SuperU®, un engrais à base d'urée renfermant à la fois du NBPT (un inhibiteur de l'uréase) et du DCD (un inhibiteur de la nitrification).

Au terme de recherches menées dans l'Ouest canadien, M^{me} Cynthia Grant (2005) a trouvé sept avantages à l'amélioration de l'efficacité des engrais azotés. Elle estime que ces produits peuvent contribuer à :

- réduire au minimum les concentrations d'azote inorganique dans les sols, ce qui réduit les risques de pertes;
- éviter les investissements en capital dans du matériel spécialisé de mise en place de l'engrais;
- réduire les besoins en main-d'œuvre;

- offrir plus de souplesse dans le choix du moment des épandages;
- éviter les risques de ne pouvoir faire les épandages aux moments appropriés;
- gérer le ratio ammonium: nitrate en fonction des besoins des cultures;
- réduire le bagage de connaissances nécessaires à leur utilisation.

Retarder la libération de l'azote soluble peut présenter des inconvénients si l'utilisation de ces produits n'est pas planifiée avec soin. La plupart des engrais sont offerts sous une forme soluble afin de maximiser leur biodisponibilité. Ce n'est que dans des situations particulières, lorsque les apports dépassent les prélèvements par la culture au cours d'une période raisonnable, que les produits mentionnés plus haut apportent un gain d'efficacité.

Phosphore

Les produits conçus pour améliorer l'efficacité des prélèvements de P empêchent la fixation du P dans le sol. Ces produits comprennent des matières organiques ou humiques et des revêtements de polymère qui réduisent la vitesse de diffusion depuis le granulé jusqu'aux sites de fixation dans le sol. Par exemple, du phosphate monoammonique de formule 11-52-0 enduit d'un copolymère itaconique maléique (AVAIL®) est actuellement commercialisé en Amérique du Nord.

Dans certaines conditions de sol, le ralentissement de la libération du phosphate pourrait éventuellement

réduire les réactions de fixation qui nuisent à l'assimilabilité du P appliqué. Par exemple, Garcia et coll. (1997) ont découvert que le phosphate d'urée ou que le superphosphate triple enduit de lignine a augmenté la biodisponibilité du P dans un sol fixateur de P hautement calcaire, tandis que ni le superphosphate ni le phosphate diammonique non revêtus ne l'ont augmentée. Toutefois, le moment de la libération est un facteur critique pour la plupart des engrais de démarrage. La plupart des grandes cultures ont besoin que du P assimilable soit libéré au profit des plantules dans les quelques semaines qui suivent l'ensemencement.

Certains produits qui inoculent le sol de micro-organismes augmentant la biodisponibilité du phosphore ont été évalués en Ontario. En général, ils ne procure-raient pas d'avantages économiques. Par exemple, deux années de recherche sur *Penicillium bilaii* indiquent que l'inoculant serait inefficace à accroître la croissance des jeunes plants et les rendements du maïs (Stevenson, 1994).

Produits destinés à l'agriculture biologique

Bon nombre des produits énumérés ci-dessus ne sont pas homologués pour une utilisation en agriculture biologique. Selon l'Office des normes générales du Canada, les produits utilisés en agriculture biologique pour améliorer la fertilité des sols doivent être d'origine végétale, animale, microbienne ou miné-

rale et peuvent être soumis à des procédés physiques, enzymatiques ou microbiens. Étant donné que la plupart des engrais à base de N, de P et de K subissent certains traitements chimiques, ils sont considérés comme des produits « synthétiques », à l'exception de certaines formulations de phosphate de chaux naturel, de chlorure de potassium, de sulfate de potassium et de sulfate de potassium-magnésium. Pour une liste détaillée des substances autorisées, communiquer avec l'Office des normes générales du Canada.

Mélanges d'engrais

Les premiers engrais mélangés ont fait leur apparition sur le marché il y a plus d'un demi-siècle, mais les formes primitives laissaient beaucoup à désirer. Pendant nombre d'années, les engrais étaient livrés à la ferme en poudres fines conservées dans des sacs de papier. Ces produits avaient tendance à bloquer le dispositif d'épandage ou à s'agglutiner en présence d'humidité.

Dans les années 1950, sont apparus sur le marché ontarien des engrais composés complexes sous une forme granulaire. Chaque granulé de ces engrais contenait l'ensemble des éléments nutritifs. Ces granulés, dont la fabrication réclamait du matériel encombrant et coûteux, ont bientôt été remplacés par les mélanges d'engrais en vrac.

La préparation d'un mélange d'engrais en vrac consiste à mélanger divers engrais granulaires entre eux dans les proportions voulues. En Ontario, cette opéra-

tion s'effectue généralement chez les mélangeurs détaillants établis localement.

Ces exploitants préparent rapidement des mélanges à la carte prêts à être épandus sur les champs. Un mélange à la carte, ou formule-client, s'obtient en mélangeant les divers granulés de façon à obtenir une formulation composée conforme aux recommandations de fertilisation établies pour un champ et une culture donnés.

Les mélanges à la carte sont efficaces pour les raisons suivantes :

- ils fournissent la quantité exacte d'éléments nutritifs nécessaires à la culture;
- ils sont moins susceptibles d'absorber l'humidité et de s'agglutiner pendant l'entreposage;
- ils réduisent au minimum les coûts de fertilisation, puisque ce sont des produits qui ne nécessitent aucun support et qui sont à teneur élevée en éléments nutritifs.

Même si leur coût par tonne peut être plus élevé, leur coût par hectare est moindre. La possibilité de préparer des mélanges offrant différentes teneurs en éléments nutritifs à partir de peu d'ingrédients permet aussi d'économiser sur les coûts d'entreposage.

NE PAS MÉLANGER

- du nitrate d'ammonium avec de l'urée;
- du superphosphate avec de l'urée.

Inconvénients des mélanges

Les mélanges en vrac et plus particulièrement les mélanges à la carte présentent quelques inconvénients. Ainsi, la forte teneur en éléments nutritifs des produits concentrés d'aujourd'hui fait en sorte qu'il est difficile de mesurer de faibles doses d'éléments nutritifs.

Pour certaines applications, il y a des avantages à utiliser des engrais composés où chaque granulé renferme plusieurs éléments nutritifs. Mentionnons à titre d'exemple les engrais de démarrage qui contiennent de petites quantités d'oligo-éléments et les engrais pour pelouses résidentielles. Ces engrais homogénéisés assurent une répartition uniforme de tous les éléments nutritifs et sont pratiques à utiliser. Le seul inconvénient qu'ils présentent, toutefois, est d'être offerts selon des ratios d'éléments nutritifs fixes et d'être par conséquent difficiles à adapter aux besoins révélés par les analyses de sol.

Compatibilité physique et chimique des constituants des mélanges

Les engrais sont généralement compatibles les uns aux autres tant qu'ils demeurent secs.

Il existe pourtant certaines exceptions.

- **Ne pas mélanger de nitrate d'ammonium avec de l'urée.** Si ces deux substances sont mises en présence l'une de l'autre, le mélange est tellement hygroscopique (absorbe tellement l'humidité de l'air) qu'il

devient en un rien de temps une bouillie inutilisable. Il faut prendre des mesures pour éviter l'intercontamination pendant l'entreposage et la manutention. Avant de mettre ensemble deux engrais mélangés, en vérifier les ingrédients pour s'assurer de ne pas mettre en présence du nitrate d'ammonium et de l'urée.

- **Ne pas mélanger de superphosphate simple ou triple avec de l'urée.** Les superphosphates (0-20-0 ou 0-46-0) peuvent réagir avec l'urée, surtout s'ils ne sont pas secs et durs. Si cette réaction s'enclenche, l'urée est dégradée et le mélange devient collant.
- **Épandre dès que possible les mélanges contenant du superphosphate et du phosphate diammonique.** Les superphosphates simples ou triples peuvent réagir avec le phosphate diammonique en présence d'humidité. Le mélange devient alors collant et finit par s'agglutiner.
- **Épandre dès que possible les mélanges contenant des oligo-éléments.** Certains ingrédients des oligo-éléments (particulièrement les sulfates) peuvent absorber l'humidité de l'air.

Importance de l'uniformité dans le calibre des granulés

Lors de la préparation et de l'application de mélanges en vrac, il est de toute première importance que le calibre des granulés soit uniforme.

Si leur taille varie, un tri s'opérera lors de leur écoulement dans la trémie; les granulés les plus gros iront vers l'extérieur du tas et les plus petits, vers le centre. Cette ségrégation peut entraîner une forte variation de la composition de l'engrais dans les diverses parties du tas.

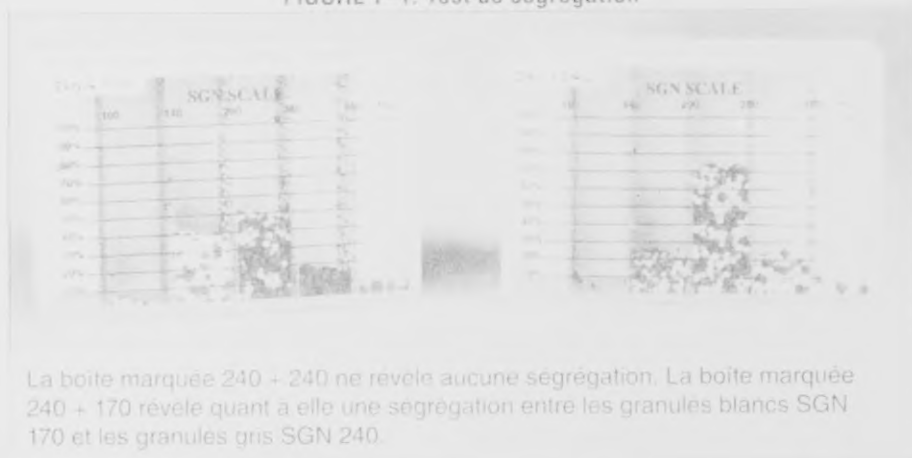
Le calibre des granulés influence également sur le profil d'épandage de l'engrais. Des tests menés par la Tennessee Valley Authority ont permis d'observer une plage de largeurs de travail d'épandage allant de 10,5 m, pour les granulés d'un diamètre de 1,7 mm, à 19,5 m, pour les granulés d'un diamètre de 3 mm. Si les constituants du mélange sont de calibres différents, l'épandage des divers ingrédients ne sera pas uniforme.

Le mélangeur doit donc absolument utiliser des granulés de même calibre. L'Institut canadien des engrais fait la promotion depuis 1986 du système SGN, un système de numérotation qui permet d'identifier le calibre des granulés.

Les numéros du système SGN correspondent au diamètre moyen des granulés, mesuré en millimètres et multiplié par 100. Ainsi, un numéro SGN de 280 signifie que la moitié de l'échantillon d'engrais est retenue par un tamis d'essai d'une ouverture de mailles de 2,80 mm. Le numéro SGN et l'indice d'uniformité, qui mesure l'uniformité du calibre des granulés, sont les deux critères employés pour simplifier le choix de granulés de calibres compatibles.

La figure 7-1 illustre bien la ségrégation qui s'opère quand les

FIGURE 7-1. Test de ségrégation



granules ne sont pas de même calibre. Le mélange d'engrais en vrac préparé à partir des ingrédients de la boîte marquée 240 + 170 subira une ségrégation importante dans la tremie à engrais, qui se traduira par une application non uniforme des éléments nutritifs dans le champ.

Établissement des formules

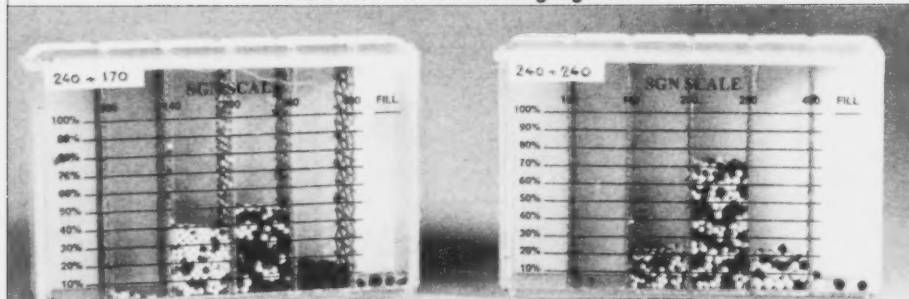
Un mélange à la carte est un produit formule pour correspondre exactement aux recommandations de fertilisation. La formule n'est rien de plus qu'une recette élaborée à partir des granules disponibles de manière à fournir aux plantes les éléments nutritifs voulus.

Les mêmes calculs s'appliquent à toute combinaison d'ingrédients, mais la plupart des mélangeurs utilisent une gamme restreinte d'ingrédients. Il s'agit normalement d'une source de N (46-0-0, 27-0-0, etc.), d'une source de P (18-46-0, 11-52-0, 0-46-0, etc.) et d'une source de K (0-0-60, 0-0-62, etc.).

Comme la composition exacte des ingrédients peut varier, selon leur source, il est important de savoir quels sont les ingrédients disponibles. Certains mélangeurs stockent également des ingrédients spécialisés pour certaines cultures comme le tabac.

Une calculatrice est à peu près tout ce qu'il faut pour décider des formules. Le calcul le plus important consiste à déterminer la quantité d'engrais nécessaire pour offrir aux plantes chaque élément nutritif. Pour ce faire, on utilise la proportion de chaque élément nutritif dans l'ingrédient (la proportion étant le pourcentage divisé par 100 — les parties décimales de 1, plutôt que les parties de 100. Ainsi, 46 % devient 0,46). Calculer la quantité d'ingrédients nécessaire en divisant la quantité d'éléments nutritifs requise par la proportion d'éléments nutritifs présents dans l'ingrédient. Un exemple est fourni

FIGURE 7-1. Test de ségrégation



La boîte marquée 240 + 240 ne révèle aucune ségrégation. La boîte marquée 240 + 170 révèle quant à elle une ségrégation entre les granules blancs SGN 170 et les granules gris SGN 240.

granulés ne sont pas de même calibre. Le mélange d'engrais en vrac préparé à partir des ingrédients de la boîte marquée 240 + 170 subira une ségrégation importante dans la trémie à engrais, qui se traduira par une application non uniforme des éléments nutritifs dans le champ.

Établissement des formules

Un mélange à la carte est un produit formulé pour correspondre exactement aux recommandations de fertilisation. La formule n'est rien de plus qu'une recette élaborée à partir des granulés disponibles de manière à fournir aux plantes les éléments nutritifs voulus.

Les mêmes calculs s'appliquent à toute combinaison d'ingrédients, mais la plupart des mélangeurs utilisent une gamme restreinte d'ingrédients. Il s'agit normalement d'une source de N (46-0-0, 27-0-0, etc.), d'une source de P (18-46-0, 11-52-0, 0-46-0, etc.) et d'une source de K (0-0-60, 0-0-62, etc.).

Comme la composition exacte des ingrédients peut varier, selon leur source, il est important de savoir quels sont les ingrédients disponibles. Certains mélangeurs stockent également des ingrédients spécialisés pour certaines cultures comme le tabac.

Une calculatrice est à peu près tout ce qu'il faut pour décider des formules. Le calcul le plus important consiste à déterminer la quantité d'engrais nécessaire pour offrir aux plantes chaque élément nutritif. Pour ce faire, on utilise la proportion de chaque élément nutritif dans l'ingrédient (la proportion étant le pourcentage divisé par 100 — les parties décimales de 1, plutôt que les parties de 100. Ainsi, 46 % devient 0,46). Calculer la quantité d'ingrédients nécessaire en divisant la quantité d'éléments nutritifs requise par la proportion d'éléments nutritifs présents dans l'ingrédient. Un exemple est fourni

à la figure 7-2. On trouve une feuille de calcul vierge à l'annexe A.

Pour calculer les mélanges d'engrais contenant N et P, on procède de la même façon que pour les mélanges N-K ou P-K, si ce n'est qu'on voudra tirer parti des économies possibles offertes par le PDA et le PMA. Il faudra pour ce faire ajouter quelques étapes au processus et calculer la quantité de l'ingrédient nécessaire pour répondre aux besoins en l'un des éléments nutritifs, puis retrancher des besoins en l'autre élément nutritif l'apport de cet autre élément, procuré par la quantité calculée. Voir la figure 7-3 et l'annexe B.

Le premier calcul effectué dépend du ratio N:P nécessaire et du type de phosphate d'ammonium choisi (PDA ou PMA). En règle générale, on commence par le calcul visant le P s'il s'agit d'un engrais à forte teneur en N (plus d'une partie de N pour deux parties de P). On commence par le calcul visant le N s'il s'agit d'un engrais présentant un ratio N:P de 1:4 et moins. Il existe aussi des logiciels qui facilitent les calculs des mélanges. Par exemple, le Fertilizer Chooser sur le site <http://soilfertility.unl.edu/> détermine les mélanges les plus économiques à partir d'une liste d'ingrédients auxquels correspondent des prix indiqués par l'utilisateur.

Aspects juridiques

L'Agence canadienne d'inspection des aliments surveille et vérifie les engrais et suppléments vendus ou importés au Canada. Le but de la *Loi*

sur les engrais et de son règlement d'application est de veiller à ce que les engrais et suppléments soient sans danger, efficaces et annoncés correctement sur le marché.

La plupart des engrais et suppléments sont réglementés, même si l'homologation n'est pas exigée pour tous ces produits. Les oligo-éléments, les engrais-pesticides et les suppléments qui ne figurent pas à l'annexe II du *Règlement sur les engrais* (régulateurs de croissance, amendements de synthèse, agents mouillants, inoculants microbiens, etc.) doivent d'abord être homologués avant d'être importés au Canada et/ou vendus au Canada.

Tous les produits doivent être sans danger pour les plantes, les animaux, les humains et l'environnement. Ils doivent être efficaces et être étiquetés convenablement. L'étiquette d'un engrais ou d'un supplément doit comporter au minimum les éléments d'information suivants : nom, formule (s'il y a lieu), marque (s'il y a lieu), nom et adresse du fabricant ou du détenteur de l'homologation, numéro de lot (s'il y a lieu), numéro d'homologation (s'il y a lieu), composition garantie, mode d'emploi (s'il y a lieu), poids du produit et précautions à prendre. Des éléments d'information supplémentaires peuvent être exigés sur l'étiquette de certains engrais et suppléments de spécialité. La composition des produits doit correspondre à la composition garantie indiquée sur l'étiquette, celle-ci étant sujette à une surveillance et à une inspection.

Bien des fabricants d'engrais et mélangeurs font partie du Programme canadien de contrôle de la qualité des engrais. Dans le cadre de ce programme à participation facultative, les participants prélèvent leurs propres échantillons et les expédient aux laboratoires accrédités transmettent les résultats d'analyse à l'Agence canadienne d'inspection des aliments. Les résultats sont compilés et les fabricants ou mélangeurs qui présentent suffisamment d'échantillons obtiennent une cote. Ces cotes sont publiées annuellement dans le Rapport canadien de vérification de la qualité des engrais, qui est largement diffusé. Un client peut demander de connaître la cote accordée à un fournisseur dans ce rapport.

Pour de plus amples renseignements, communiquer avec le Service des engrais, Agence canadienne d'inspection des aliments, 2, crois-sant Constellation, Ottawa (Ontario) K1A 0Y9.

Tout engrais doit être convenablement étiqueté, qu'il soit homologué ou non. L'information qui figure sur l'étiquette doit inclure le nom, la formule, la composition garantie, le fabricant, le conditionneur et le poids du produit. Des données supplémentaires sont exigées pour certains types de produits. La composition garantie indiquée sur l'étiquette doit pouvoir être confirmée par d'éventuels contrôles et inspections.

**FIGURE 7-2. Feuille de calcul des mélanges d'engrais :
exemple pour mélanges N-K ou P-K**

1. Dresser la liste des ingrédients disponibles et des formules.

Ingrédient	Formule
urée	46-0-0
superphosphate triple	0-46-0
chlorure de potassium	0-0-60

2. Préciser les besoins en éléments nutritifs (ou le ratio ou la formule désirés) :
130-0-90 kg/ha

3. Calculer la quantité de l'ingrédient nécessaire pour combler les besoins en chaque élément nutritif. Répéter pour chaque élément nutritif.

besoin	130	= quantité de l'ingrédient	283
proportion de l'élément	0,46		
besoin	90	= quantité de l'ingrédient	150
proportion de l'élément	0,60		
besoin		= quantité de l'ingrédient	
proportion de l'élément			

4. Ajouter le poids des ingrédients et calculer les apports d'éléments nutritifs.

Ingrédient	Poids	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
urée	283	130	0	0
KCl	150	0	0	90
Total	433	130	0	90

Le poids total du mélange à ce point est la dose. Les unités seront les mêmes que pour les besoins initiaux en éléments nutritifs.

5. Calculer la quantité totale d'engrais nécessaire.

$$\begin{aligned} \text{dose} \times \text{superficie du champ} &= \text{poids total de l'engrais} \\ 433 \text{ kg/ha} \times 20 \text{ ha} &= 8640 \text{ kg} \end{aligned}$$

6. Rajuster le poids des ingrédients pour obtenir la formule en kilogrammes/tonne.

Diviser le poids de chacun des ingrédients par le poids total et multiplier par 1000.

Ingrédient	Poids	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
urée	654	301	0	0
KCl	346	0	0	208
Total	1000 kg	301	0	208
Formule (diviser par 10 les totaux N, P et K)		30,1	0	20,8

L'annexe A renferme des formulaires vierges à reproduire et à utiliser.

FIGURE 7-3. Feuille de calcul des mélanges d'engrais : exemple pour mélanges N-P-K

1. Dresser la liste des ingrédients disponibles et des formules.

Ingrédient	Formule
urée	46-0-0
phosphate monoammonique (PMA)	11-52-0
superphosphate triple	0-46-0
chlorure de potassium	0-0-60

2. Préciser les besoins en éléments nutritifs (ou le ratio ou la formule désirés) :

90-90-110 lb/ac

3. Calculer la quantité de l'ingrédient (PMA) nécessaire pour combler le besoin en N (ratios de P élevés) ou en P (ratios de N élevés).

$$\frac{\text{besoin}}{\text{proportion de l'élément}} = \frac{90}{0,52} = \text{quantité de PMA (lb/ac)} \quad 173$$

4. Calculer l'apport de l'autre élément, procuré par la quantité de l'ingrédient calculée.

$$\text{ingrédient nécessaire} \times \text{proportion de l'élément} = \text{apport} \quad 173 \times 0,11 = 19$$

5. Retrancher du besoin en l'autre élément l'apport de cet autre élément, procuré par la quantité de l'ingrédient calculée, de manière à obtenir le besoin résiduel en l'autre élément.

(Nota : si l'apport est supérieur au besoin, c'est que le calcul fait en premier visait le mauvais élément nutritif. Reprendre à l'étape 3.)

$$\text{Besoin} - \text{apport} = \text{besoin résiduel} \quad 90 - 19 = 71$$

6. Déterminer la quantité de l'ingrédient nécessaire pour répondre au besoin résiduel (source de N ou source de P).

$$\frac{\text{besoin résiduel}}{\text{proportion de l'élément}} = \frac{71}{0,46} = \text{quantité de l'ingrédient} \quad 154$$

7. Préciser la quantité de chlorure de potassium nécessaire pour répondre au besoin en K.

$$\frac{\text{besoin en K}}{\text{proportion de l'élément}} = \frac{110}{0,60} = \text{quantité de l'ingrédient} \quad 183$$

8. Calculer de la même façon tous les ingrédients nécessaires pour chacun des autres oligo-éléments.

9. Ajouter le poids des ingrédients et calculer les apports d'éléments nutritifs.

Ingrédient	Poids	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
PMA	173	19	90	0
urée	154	71	0	0
potasse	183	0	0	110
Total	510	90	90	110

Le poids total du mélange à ce point est la dose. Les unités seront les mêmes que pour les besoins initiaux en éléments nutritifs.

10. Calculer la quantité totale d'engrais nécessaire.

$$\begin{aligned} \text{dose} \times \text{superficie du champ} &= \text{poids total de l'engrais} \\ 510 \text{ lb/ac} \times 40 \text{ ac} &= 20\,400 \text{ lb (9\,251 kg)} \end{aligned}$$

11. Rajuster le poids des ingrédients pour obtenir la formule en kilogrammes/tonne.

Diviser le poids de chacun des ingrédients par le poids total et multiplier par 1000.

Ingrédient	Poids	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
PMA	339	37	176	0
urée	302	139	0	0
potasse	359	0	0	215
Total	1000 kg	176	176	215
Formule (diviser le total pour N, P et K par 10)		17,6	17,6	21,5

Il est maintenant possible de calculer le prix de l'engrais.

L'annexe B renferme un formulaire vierge à reproduire et à utiliser.

Application des engrais

L'objectif de tout programme de fertilisation est d'améliorer le rendement et la qualité des cultures en leur procurant les éléments nutritifs dont elles ont besoin. Si l'engrais n'est pas mis en place à l'endroit où les racines peuvent l'atteindre ni quand la culture en a besoin, l'exercice sera vain.

La localisation de l'engrais est une solution de compromis entre l'épandage de l'engrais en concentrations optimales précisément à l'endroit et au moment où les plantes en ont besoin et les considérations pratiques liées au temps et au matériel dont on dispose pour réaliser l'épandage. Si un système d'épandage plus coûteux est envisagé, celui-ci doit, pour compenser, offrir des avantages, par exemple un meilleur rendement ou une réduction du coût des engrais.

La mise en place optimale pour un élément nutritif (ou une combinaison d'éléments nutritifs) en particulier dépend de la mobilité de l'élément nutritif dans le sol, de la concentration nécessaire aux cultures, de sa toxicité à fortes concentrations, de la texture et de l'humidité du sol, ainsi que de la culture visée.

Innocuité pour les cultures

Les tissus végétaux sont sensibles aux blessures infligées par de fortes concentrations salines (pression osmotique) ou l'ammoniac libre (les deux pouvant être le résultat d'une

trop grande concentration d'engrais dans un volume de sol trop faible.

Les brûlures causées par les engrais se manifestent par un système racinaire réduit et des zones noircies ou décolorées sur les racines, comme si elles avaient été brûlées. Ce sont les plantules qui en souffrent le plus, du fait de la plus grande sensibilité des tissus jeunes, de la plus grande proportion des tissus qui sont alors touchés et des réserves qui sont moins abondantes et qui aident moins la culture à se remettre des dommages. Sans compter que la croissance demeure plus difficile là où les concentrations d'engrais sont fortes.

Les dommages causés par les engrais sont d'abord et avant tout le fait de concentrations trop fortes plutôt que de quantités totales épandues. Les engrais épandus en bandes sont plus susceptibles d'infliger des blessures que les engrais épandus en pleine surface.

Si l'engrais est épandu avec un semoir à maïs dans une bande de 2,5 cm sur des rangs espacés de 0,75 m, la concentration dans la bande est 30 fois supérieure à ce qu'elle aurait été si l'engrais avait été épandu en pleine surface. De plus, la distribution le long des rangs n'est pas toujours uniforme, de sorte que la dose peut être beaucoup plus élevée à certains endroits.

La concentration peut être diluée si l'engrais se répand à l'extérieur de la bande, mais l'ampleur de la dilution dépend de la texture et de l'humidité du sol. Dans les sols humides, la dilution est plus forte. Les brûlures causées par les engrais

sont fréquentes les printemps secs et dans des sols bien drainés à texture grossière. Comme les sols à texture grossière à faible teneur en matière organique offrent une moins grande surface de réaction avec l'engrais et d'adsorption de celui-ci, la concentration dans la solution de sol demeurera plus élevée que dans les sols argileux.

La proximité des semences ou des plants repiqués avec la bande fertilisée augmente aussi le risque de brûlure. Si l'engrais est trop proche, il a peu de chances d'être dilué par l'eau du sol. Les racines elles-mêmes ont peu de chances, sinon aucune, de croître au delà de la zone de concentration. L'azote et le potassium, plus particulièrement, peuvent être nocifs pour les plantules et nuire à la germination des semences. Dans les sols froids, peu propices à la croissance racinaire, les effets peuvent être amplifiés.

Si l'engrais est épandu en bandes dans la raie de semis, la dose sécuritaire est bien inférieure à celle d'un engrais épandu en bandes à 5 cm sur le côté et à 5 cm au-dessous des semences. Même aux doses recommandées, l'engrais épandu dans la raie de semis ralentit légèrement la germination et la levée, car le sel ralentit l'absorption de l'eau. L'épandage de l'engrais dans la raie de semis ne convient pas à toutes les cultures.

Des dommages par le sel sont à craindre quand la concentration d'ions dans la solution de sol est supérieure à celle qu'on trouve à l'intérieur de la plante. L'eau est alors attirée à travers la membrane

cellulaire, hors de la racine. Les tissus de la racine sont endommagés par dessiccation et semblent avoir été brûlés légèrement par de l'air chaud.

Tout composé soluble en concentration suffisamment forte entraînera des dommages causés par le sel. Plus un engrais est soluble, plus le risque de dommages par le sel est grand. Les acides et les hydroxydes risquent un peu moins de causer de tels dommages, mais ces ingrédients, tels qu'ils sont utilisés dans la fabrication des engrais, sont combinés à des composés solubles avant l'épandage.

L'ammoniac peut causer des dommages aux tissus quand on retrouve de l'ammoniac libre dans la solution de sol. Normalement, ce composé se dissout en ions ammonium, mais à fortes concentrations, et plus particulièrement dans des conditions d'alcalinité, une partie de l'ammonium se trouve libérée en ammoniac. Cette situation peut se produire au moment des épandages d'ammoniac anhydre ou de fortes doses de fumier liquide ou si l'urée ou le phosphate diammonique (PDA, 18-46-0) est épandu en bandes près du rang. Les symptômes de dommages par l'ammoniac sont analogues à ceux qui sont causés par le sel et sont souvent concomitants.

Les cultures ne sont pas toutes également sensibles aux dommages causés par les engrais. De façon générale, les graminées (monocotylédones) y sont beaucoup moins sensibles que les cultures à feuilles larges (dicotylédones). Parmi les

graminées, les céréales sont plus tolérantes que le maïs aux fortes doses d'engrais épandus en bandes. Chez les dicotylédones, le soya et les haricots comestibles sont plus sensibles que les légumineuses fourragères ou le canola, mais toutes ces cultures demeurent beaucoup plus sensibles que le maïs.

En règle générale, les légumes semés sont assez sensibles aux dommages causés par les engrais.

Le tableau 7-4 indique les doses d'engrais maximales jugées sécuritaires.

Méthodes d'application

Épandage en plein ou en pleine surface

L'épandage en pleine surface est de loin la méthode la plus rapide et la moins coûteuse. L'engrais est épandu uniformément à la surface du sol, puis, dans la plupart des grandes cultures, est incorporé au sol. Cette façon de procéder offre la meilleure dilution possible et réduit du coup les risques de brûlures par les engrais. Elle peut cependant nuire au prélèvement des éléments nutritifs, comme le phosphore, si la concentration de l'élément joue un rôle critique dans le prélèvement des éléments nutritifs par un petit système racinaire. L'épandage en pleine surface a aussi l'avantage de maximiser le contact entre l'engrais et le sol, d'où une immobilisation plus rapide des éléments nutritifs dans le sol, comparativement à l'épandage en bandes.

Les brûlures par les engrais peuvent quand même se produire dans des sols très sableux à faible teneur en matière organique. L'application sur ces sols de fortes doses d'urée et de potasse peut endommager les plantules par temps sec, surtout si l'application se double de l'épandage d'un engrais en bandes ou dans la raie de semis.

Dans le cas des engrais granulaires, que l'épandeur soit tracté ou automoteur, il existe deux types d'organe de dispersion : il peut être centrifuge ou pneumatique (jet d'air). L'un et l'autre donnent de bons résultats pour peu que l'appareil soit opéré et entretenu correctement.

Épandeurs centrifuges

Dans le cas des épandeurs centrifuges, l'engrais est dispersé par des pales de projection installées sur un ou deux disques tournant à grande vitesse. Il est important que le calibre des granules soit uniforme, car une petite particule n'étant pas projetée aussi loin qu'une grosse, l'épandage risquerait autrement d'être inégal. L'uniformité de l'épandage peut être compromise si les conditions sont venteuses ou s'il y a accumulation d'engrais dans le distributeur ou sur les pales. Même si des nettoyages fréquents s'imposent, les parties à nettoyer sont facilement accessibles.

Les épandeurs centrifuges sont passablement simples sur le plan mécanique et relativement peu coûteux. La puissance nécessaire est modeste : tout tracteur capable de tirer l'épandeur dispose de

TABLEAU 7-4. Doses maximales sécuritaires d'éléments nutritifs

La surfertilisation peut endommager les plantules par l'action de l'ammoniac et du sel. Ces dommages sont attribuables aux teneurs en azote (N) et en potassium (K) de l'engrais. La toxicité varie considérablement selon la texture du sol, les conditions d'humidité, la culture, la source d'engrais et la mise en place de l'engrais. Le présent tableau fournit des lignes directrices qui devraient limiter les dommages à moins de 10 % des cas où elles sont utilisées. Les dommages comprennent une réduction de la germination ou un retard dans la germination ou la croissance. Les conditions météorologiques, les facteurs de stress et autres conditions qui influencent la croissance peuvent augmenter les risques de dommages.

Avoine et orge du printemps (engrais avec la semence)		N (kg/ha)	N + K₂O (kg/ha)
Sables, loams sableux	Urée (46-0-0) :	10	30
	Phosphate diammonique (18-46-0) :	20	35
	Autres engrais :	35	55
Loams, limons, loams argileux	Urée (46-0-0) :	10	30
	Phosphate diammonique (18-46-0) :	30	55
	Autres engrais :	45	70
Triticale, orge ou blé d'automne (engrais avec la semence)			
Tous les sols	Urée (46-0-0) :	0 (automne)	0 (automne)
	Phosphate diammonique (18-46-0) :	0 (automne)	0 (automne)
	Autres engrais :	15	30
Maïs (engrais en bandes avec la semence)			
Tous les sols	Urée (46-0-0) :		0
	Phosphate diammonique (18-46-0) :		0
	Autres engrais — rangs écartés de 100 cm :	0	7
	— rangs écartés de 75 cm :	0	10
	— rangs écartés de 50 cm :		14
Le maïs sucré peut être plus sensible à l'engrais placé avec la semence. Ne pas épandre d'engrais avec la semence dans le cas des hybrides de maïs super sucré.			
Maïs (engrais en bandes à 5 cm sur le côté et 5 cm sous la semence)			
Tous les sols	Urée (46-0-0) :	39	60
	Autres engrais :	55	90
Si les doses sont plus fortes, éloigner la bande d'au moins 15 cm de la semence. Pour les distances entre les rangs autres que 100 cm, rajuster la dose de manière à conserver la même concentration maximale dans le rang (par exemple, dans des rangs écartés de 50 cm, la dose sécuritaire est de $100/50 \times 55 = 110$ kg de N/ha).			
Maïs (engrais en pleine surface)			
Sables, loams sableux	Urée (46-0-0) :	200	250
Canola (engrais avec la semence)			
On peut injecter jusqu'à 20 kg d'engrais phosphaté/ha avec la semence sous forme de superphosphate ou de phosphate monoammonique. Ne pas épandre de N (sauf le phosphate monoammonique) ni de K avec la semence.			
Lin (pas d'engrais avec la semence)			
Les doses recommandées sont normalement sécuritaires pour les épandages en pleine surface.			
Pois, haricots et soya (pas d'engrais avec la semence)			
Tous les sols (engrais en bandes à 5 cm sur le côté et 5 cm sous la semence) :		30	90
Les engrais dont la teneur en N représente plus de la moitié de la teneur en P ₂ O ₅ (p. ex. 16-16-16) renferment souvent de l'urée. Bien souvent, les engrais qui renferment de l'urée ne se prêtent pas à l'épandage en bandes à l'ensemencement.			

suffisamment de puissance pour les organes rotatifs. Les épandeurs centrifuges sont ceux qu'on trouve le plus souvent dans les centres de location, en raison de leur faible coût, de leur fonctionnement habituellement sans problème et de la facilité avec laquelle ils peuvent être réparés au champ.

Épandeurs pneumatiques

Dans les épandeurs pneumatiques, un jet d'air à forte vélocité fait circuler les granulés le long d'une rampe jusqu'aux distributeurs espacés d'environ 1,7 m. Ces épandeurs ont besoin de plus de puissance, car le ventilateur qui crée le flux d'air tourne à grande vitesse. Ces épandeurs sont également plus complexes en raison des pièces mobiles dans le ventilateur et du système de mesure qui distribue l'engrais uniformément à chacune des sections de rampe.

Toutefois, le dosage peut être plus précis que dans les épandeurs centrifuges et le mélange qui s'effectue dans le flux d'air permet d'ajouter de petites quantités d'herbicides granulaires ou d'oligo-éléments.

Les distributeurs étant relativement rapprochés, le vent influence moins la qualité d'épandage que dans le cas des épandeurs centrifuges. Les appareils automoteurs offrent souvent une largeur de travail d'épandage plus grande que les épandeurs centrifuges, ce qui procure un plus grand débit pour la même unité de puissance. Il est rare que la machine se bloque, en raison de la grande vitesse du flux d'air, mais l'épandeur doit être surveillé

davantage si le temps est humide ou que les granulés le sont.

Étant relativement coûteux et complexes, les épandeurs pneumatiques ne conviennent généralement pas à l'usage qu'en font les particuliers. Ils n'en sont pas moins le premier choix des entreprises d'épandage à forfait.

Système Tru-Spread

Le système Tru-Spread fait appel à un convoyeur à vis sans fin qui achemine l'engrais granulaire sur la largeur de la rampe et le laisse tomber par des ouvertures espacées de 17,5 cm. Il procure un dosage assez précis et la qualité du travail n'est pas influencée par le vent.

Matériel de pulvérisation

Les engrais destinés aux épandages en pleine surface sont la plupart du temps des engrais granulaires, mais il arrive souvent qu'il s'agisse d'engrais azotés liquides. Ceux-ci doivent être épandus à l'aide de pulvérisateurs comme dans le cas des herbicides. Les solutions d'azote peuvent d'ailleurs servir de support aux herbicides épandus, ce qui permet de faire d'une pierre deux coups.

Les pulvérisateurs procurent habituellement un épandage uniforme, mais ils obligent à composer avec les risques de dérive par temps venteux. Certaines pulvérisateurs ne donnent pas d'aussi bons résultats lorsqu'ils servent à épandre des engrais liquides parce qu'ils ne sont pas conçus pour gérer de gros volumes ou subissent la corrosion

causée par certains constituants des engrais.

Fertilisation à dose variable

Les épandeurs d'engrais à dose variable les plus simples sont les épandeurs traditionnels qui, quel qu'en soit le type, sont munis d'un récepteur GPS et d'une liaison au contrôleur. Ces dispositifs permettent d'épandre des doses variables de l'engrais ou du mélange d'engrais. Il arrive que plusieurs passages soient nécessaires pour répondre aux besoins en engrais. Toutefois, le matériel est moins coûteux que les épandeurs à dose variable à multitrémies. La nécessité de faire plusieurs passages a pour effet de ralentir les opérations et d'accroître le compactage du sol.

Dans le cas des épandeurs à dose variable à multitrémies, chaque trémie peut être commandée individuellement. Il est ainsi possible en un même passage d'appliquer jusqu'à neuf produits suivant des doses variables. Les trémies peuvent contenir des engrais ainsi que des produits chimiques granulaires.

L'épandage de la chaux à dose variable peut se faire soit à l'aide d'une chauleuse munie d'un récepteur GPS et d'une commande de variation des doses, soit à l'aide d'une chauleuse traditionnelle dont on modifie le taux d'application dans chacune des zones préalablement marquées à partir d'une carte de sol.

Épandage en bandes

L'épandage en bandes consiste à épandre l'engrais sur une bande à côté et au-dessous des semences, dans le cas des cultures en rangs, ou avec les semences, dans le cas des céréales. Ce type d'épandage nécessite l'installation sur le semoir en lignes ou le semoir de précision de trémies et de dispositifs de dosage et d'un organe ouvreuse supplémentaire destiné à la mise en place de l'engrais. L'ajout de tout ce matériel qui alourdit le semoir peut nécessiter une plus grande puissance de remorquage. Le remplissage des trémies ralentira par ailleurs les semis.

L'épandage en bandes a l'avantage de localiser une forte concentration d'engrais là où il pourra être intercepté par les racines des jeunes plants. Cette proximité est particulièrement importante dans le cas du phosphore, qui est nécessaire au début de la croissance de nombreuses cultures.

La prudence est de mise avec l'épandage en bandes, car de fortes concentrations augmentent les risques de brûlures. Il faut limiter les doses d'azote et de potassium, surtout si de l'urée ou du phosphate diammonique constitue la source d'azote. Le pH du sol dans la bande de fertilisation influence aussi la biodisponibilité d'autres éléments nutritifs dans le sol. Voir la rubrique *pH du sol dans les bandes d'engrais de démarrage* au chapitre 4, p. 102.

Il est aussi très important de bien régler le semoir de manière à déposer l'engrais à la bonne distance des semences. Si les organes ouvreurs

viennent trop près de la raie de semis, les risques de brûlures augmentent. Si les organes ouvreur s'en écartent trop, les plantules risquent de ne pas pouvoir intercepter assez tôt l'engrais.

Les dispositifs de dosage destinés à l'épandage en bandes sont assez simples; une vis sans fin située au fond des trémies laisse tomber l'engrais par une ouverture réglable. On peut faire varier la dose par la vitesse de rotation de la vis, le réglage de l'ouverture et l'inclinaison du plan de la vis. Il faut vérifier soigneusement l'alignement de la vis d'alimentation. Si elle est déportée d'un côté, elle peut laisser tomber jusqu'à 50 % plus d'engrais de ce côté de la trémie que de l'autre côté.

Épandage de l'engrais en contact avec la semence

L'engrais peut aussi être épandu directement avec la semence (technique désignée *pop-up* en anglais), même s'il retarde alors légèrement la germination. Cette méthode offre l'avantage de fournir des gains de rendement relativement élevés dans le maïs (jusqu'à 8 boisseaux/acre selon une étude) avec de faibles doses d'engrais, même dans les sols affichant des niveaux de fertilité élevés pour lesquels on ne s'attendrait à aucun gain de rendement d'épandages en bandes ou en plein. Cette méthode assure également une augmentation constante de la vigueur des plantules.

En raison de l'étroite proximité de l'engrais et de la semence, cette méthode est celle qui comporte le

plus de risques de brûlures par l'engrais. Il est donc primordial de ne pas dépasser les doses maximales sécuritaires et de veiller à ce que le matériel épande l'engrais uniformément. Une distribution de l'engrais par à-coups peut facilement entraîner une croissance erratique des cultures, en privant d'engrais certains segments de rangs et en en surfertilisant d'autres.

Les engrais ainsi épandus sont surtout liquides, car ils sont faciles à doser avec précision et à manipuler. Pour éviter les à-coups, l'engrais doit être acheminé sous pression aux organes ouvreur et dosé à travers un orifice. Il faut veiller à ce que le tube de distribution soit bien centré sur l'organe ouvrier. Si des gouttes d'engrais liquide tombent sur les disques ouvreur, il se formera de la boue qui obstruera les orifices.

Certains agriculteurs font l'expérience de convertir leurs distributeurs d'insecticides afin qu'ils servent à l'épandage d'engrais granulaires. Ils cherchent ainsi à tirer parti des avantages de l'épandage avec les semences, sans les coûts élevés associés aux engrais liquides. La conversion les oblige à remplacer le cylindre de plastique du distributeur d'insecticides par un cylindre d'acier et à positionner le tube de distribution dans l'ouvreur de sillon. Bien que les premiers résultats soient encourageants, on s'inquiète de l'uniformité de l'épandage et de la capacité des distributeurs d'insecticides à résister à la manutention d'engrais, qui sont beaucoup plus denses que les insecticides.

Épandage en bandes latérales

L'épandage en bandes latérales consiste à épandre l'engrais, surtout l'azote, entre les rangs de la culture. Cette méthode permet de faire les apports d'azote à un moment qui coïncide avec celui où la culture en a besoin, ce qui augmente l'efficacité de l'utilisation de l'azote. L'épandage en bandes latérales réduit par ailleurs le risque de lessivage de l'azote dans les sols sableux ou le risque de dénitrification dans les sols mal drainés.

Dans les cultures de maïs, l'azote épandu en bandes latérales est le plus souvent sous forme d'ammoniac anhydre et de solution de nitrate d'ammonium et d'urée (NAU).

La forme anhydre est intéressante du fait de son faible coût par unité d'azote et du fait également que dans les sols argileux du sud-ouest de l'Ontario, elle procure un avantage sur le plan de rendement par rapport à d'autres formes d'azote. Sous cette forme, il faut injecter l'azote à une profondeur suffisante dans le sol, afin de permettre à la fente d'injection de se refermer et d'éviter ainsi que trop d'azote ne s'échappe dans l'atmosphère. L'épandage d'ammoniac anhydre nécessite davantage d'énergie, coûte plus cher et oblige à prendre des précautions pour pouvoir se faire en toute sécurité.

Comme les solutions de NAU n'ont pas à être injectées profondément dans le sol, leur application ne s'assortit pas de besoins importants en énergie. En présence d'une

épaisse couche de résidus à la surface du sol, la solution doit être placée sous la couche de résidus afin d'éviter les pertes d'ammoniac par volatilisation. Malgré son coût relativement élevé, la NAU est largement utilisée, du fait de sa sécurité d'utilisation et de sa facilité de manutention.

Si les résidus de culture sont abondants, les couteaux injecteurs risquent de s'y accrocher et de les traîner. Pour remédier à cette situation, les épandeurs conçus pour le semis direct sont pourvus de couteaux qui découpent les résidus et améliorent la pénétration du produit dans la terre ferme. D'autres épandeurs possèdent des injecteurs dotés de roues à dents qui permettent à la solution de pénétrer dans le sol en dérangeant très peu les résidus. Cette technologie donne d'assez bons résultats, mais coûte au départ plus cher que les autres types d'épandeurs en bandes latérales.

Les engrais granulaires sont utilisés pour la fertilisation en bandes latérales des cultures légumières et du tabac, mais ne sont pas très utilisés dans la culture du maïs. Il est aussi facile de se procurer ces engrais que les engrais sous les formes liquide ou gazeuse.

Épandage en bandes en profondeur

Certains producteurs épandent les engrais à base de phosphore et de potassium en bandes, à une profondeur de 15–20 cm, surtout là où ils pratiquent le semis direct et la culture sur billons dans des sols fermes. Ils espèrent ainsi s'assurer

d'une plus grande biodisponibilité des engrais en période de sécheresse et éviter la fixation des éléments nutritifs dans le sol. Jusqu'ici toutefois, le peu d'essais menés en Ontario n'ont pas fait ressortir d'avantage en termes de rendement à l'épandage en bandes en profondeur. Il reste que ce type d'épandage peut être utile dans certaines situations.

Apport d'engrais de démarrage au moment du repiquage

Le matériel repiqué tirera parti d'éléments nutritifs facilement assimilables qui favoriseront la reprise de la croissance racinaire et aideront les plants à se remettre du choc de la transplantation. Autrement, chez les jeunes plants, les racines mettront du temps à pousser et à investir le sol à la recherche d'éléments nutritifs. Les plants repiqués reçoivent l'engrais de démarrage à même l'eau d'arrosage employée au moment du repiquage ou avant la mise en place au champ.

Les solutions sont obtenues à partir d'engrais hydrosoluble ou d'engrais liquides qui procurent une source d'éléments nutritifs à la masse racinaire. Ces solutions renferment toujours du phosphore, qui est important pour le développement des racines, et peuvent aussi renfermer de l'azote et du potassium. Voici des exemples d'engrais de démarrage : 10-52-10, 6-24-6 et 10-34-0.

Les solutions de démarrage sont particulièrement importantes lorsque le sol est froid. En effet, les sols froids inhibent la croissance

racinaire et, par conséquent, le prélèvement des éléments nutritifs du sol.

Applications foliaires

Les engrais foliaires peuvent être un excellent complément aux engrais appliqués au sol. Ils peuvent remédier rapidement à des carences et ne risquent pas de se fixer aux particules de sol. En revanche, ils risquent d'être emportés par l'eau ou de voir le support s'assécher avant que l'élément nutritif ne soit absorbé. L'utilisation de mouillant-adhésif peut accroître l'absorption de l'engrais par la cuticule.

À faibles doses, ces engrais ne risquent pas d'endommager les tissus. Par conséquent, il est plus facile de corriger des carences en oligo-éléments, quand il s'agit de quelques grammes seulement par hectare, que de corriger des carences en macro-éléments nutritifs.

Même si l'urée est la source d'éléments nutritifs la plus facilement assimilable par les feuilles, il en faut souvent de nombreuses applications pour que les effets de l'apport d'azote soient manifestes. Pour cette raison, l'application foliaire de macro-éléments nutritifs a tendance à se justifier davantage dans les cultures horticoles de grande valeur que dans les grandes cultures courantes.

Dans le cas des oligo-éléments, par contre, les pulvérisations foliaires sont souvent la solution la plus économique, quelle que soit la culture. Elles sont le moyen le plus efficace de remédier à une carence en manganèse. Bien lire les éti-

quettes des produits utilisés avant de mélanger des engrais foliaires avec des bouillies pesticides. L'antagonisme du manganèse et du glyphosate notamment est bien connu.

Les applications foliaires d'urée donnent de bons résultats dans bien des cultures. L'azote provenant de l'urée peut être appliqué sur les feuilles à des concentrations beaucoup plus grandes que le phosphore et le potassium. Choisir une formule compatible avec l'alimentation des animaux ou des usages foliaires, car la teneur en biuret est alors moins élevée et ne risque pas d'endommager les tissus végétaux. On dispose de peu de données de recherches sur les doses maximales sécuritaires, mais selon certaines études, la dose à ne pas dépasser pour une seule application foliaire d'urée serait de 20 lb de N/acre à raison d'une concentration dans la bouillie inférieure à 2 %.

Fertirrigation

La fertirrigation est une forme spécialisée de fertilisation en pleine surface dans laquelle l'engrais est injecté dans l'eau d'irrigation. Cette méthode permet à l'exploitant de nourrir sa culture à faibles doses au fur et à mesure que celle-ci a besoin d'éléments nutritifs. Le coût du matériel de dosage et d'injection est faible relativement au coût du système d'irrigation. Par ailleurs, le matériel est assez simple et fiable.

Les engrais, par contre, peuvent être assez coûteux, puisqu'il s'agit d'engrais liquides qui sont ajoutés au système d'irrigation. La

fertirrigation présente aussi l'inconvénient de distribuer l'engrais aux mêmes endroits que l'eau, ce qui risque de ne pas donner un épandage uniforme. Si l'on opte pour la fertigation avec l'irrigation goutte-à-goutte, il faut veiller à éviter l'obstruction des goutteurs.

Combinaison de méthodes

Le choix de l'engrais de démarrage dépend de la culture, des besoins en minéraux et du matériel disponible. Il est souvent aussi efficace d'épandre une partie de l'engrais au démarrage de la culture et d'épandre le reste en pleine surface que d'épandre tout l'engrais à l'ensemencement. Les épandages fractionnés offrent certains avantages, notamment des économies de temps et de main-d'œuvre et la diminution des risques de voir les engrais endommager les plantules.

Il faut déduire les apports de minéraux procurés par les engrais de démarrage et les engrais épandus en bandes latérales des besoins totaux en minéraux. Ce qui reste doit être épandu en pleine surface. S'il reste très peu d'engrais à épandre, il est peut-être justifié de rajuster les doses de l'une des autres sources d'éléments nutritifs, d'oublier carrément la quantité manquante ou d'envisager une application d'engrais destinée à répondre aux besoins sur plusieurs années (dans le cas du P et du K uniquement).

Feuille de calcul relative aux applications d'engrais

Une fois les besoins des cultures établis, il reste à déterminer de quelle façon combler ces besoins. Pour des raisons économiques et environnementales, il importe d'utiliser au mieux toutes les sources d'éléments nutritifs, autant les sources organiques produites à la ferme que les sources importées et les engrais minéraux.

Doses maximales sécuritaires d'éléments nutritifs

Quelle que soit l'élément nutritif, ne jamais dépasser la dose maximale sécuritaire, afin d'éviter les dommages aux cultures. Les doses indiquées dans le tableau 7-4 peuvent entraîner l'apparition de symptômes de dommages ou des retards de croissance dans un maximum de 10 % des cas. Dans la mesure du possible, utiliser des doses moindres. Comme des dommages aux cultures sont à craindre quand les doses d'engrais sont trop fortes, le manque d'uniformité dans l'épandage peut causer des dommages par endroits même si la dose moyenne est suffisamment faible pour être sécuritaire.

La question de savoir quelles sont les doses sécuritaires dépend beaucoup de la dilution. Les dommages sont surtout observés par temps sec et dans des sols à texture grossière pauvres en matière organique.

Si les rangs sont plus étroits, la dose sécuritaire sera plus grande,

car la même quantité d'engrais est alors épandue sur une plus grande longueur de rang.

Pour prévenir les dommages par les engrais, il est important de bien entretenir le matériel. Si l'organe ouvrier de l'injecteur se déplace plus près des semences, une dose qui serait autrement sécuritaire risque de brûler les semences ou les plantules.

Source d'engrais et mise en place de l'engrais

Utiliser d'abord les sources d'éléments nutritifs produites à la ferme, car elles seront de toutes façons épandues sur les champs. Déterminer les taux d'application de manière à répondre aux besoins en azote ou en phosphore.

De nombreux producteurs trouvent avantageux de fractionner les besoins en éléments nutritifs entre des sources organiques et minérales. Ils se prémunissent ainsi contre la variabilité dans les épandages de fumier tout en tirant parti d'une source économique d'éléments nutritifs. Des éléments nutritifs de source organique mais non agricole, comme les biosolides d'épuration, peuvent être envisagés.

Les engrais chimiques servent à répondre aux besoins des cultures qui ne sont pas comblés par d'autres sources d'éléments nutritifs. Épandre les engrais chimiques aussi près que possible du moment où la culture a besoin des éléments nutritifs et aussi près du plant que possible.

Recommandations de fertilisation et calcul des doses

La figure 7-4 donne un exemple de feuille de calcul utilisée pour déterminer les doses d'engrais. Voir l'annexe C pour une feuille de calcul vierge à reproduire.

Inscrire sur la ligne supérieure les besoins en N, P_2O_5 et K_2O .

Déduire les éléments nutritifs fournis par les légumineuses, le fumier et d'autres sources organiques afin de préciser la quantité d'engrais minéraux nécessaire pour répondre aux besoins totaux.

Cette feuille de calcul se prête à des calculs en unités métriques ou en unités impériales.

FIGURE 7-4. Feuille de calcul relative aux applications d'engrais

Culture prévue	maïs		
Culture précédente	orge avec trèfle rouge		
Fumier épandu (type, quantité)	fumier solide de bovins laitiers (10 t imp./ac) incorporé au sol au printemps		
Autres sources organiques d'éléments nutritifs	aucune		
Engrais de démarrage (dose, formule)	(140 lb/ac) 8-32-16		
Azote supplémentaire (dose, formule)	aucun		
	N	P_2O_5	K_2O
Besoins (lb/ac)¹	140	45	72
moins légumineuses	40	0	0
moins fumier	30	30	140
moins biosolides d'épuration	0	0	0
Besoins totaux en engrais minéral	70	15	0
moins engrais de démarrage	11	44	22
moins engrais épandu en bandes latérales	0	0	0
Besoins totaux en engrais épandu en pleine surface	59	0	0
Dans cet exemple, les besoins totaux en engrais épandu en pleine surface sont de 59 lb de N/ac ou 128 lb d'urée/ac. On aurait aussi pu réduire la quantité d'engrais de démarrage.			
Si on a besoin d'un mélange plus complexe, on peut le calculer à l'aide de la figure 7-2, <i>Feuille de calcul des mélanges d'engrais</i> , p. 199.			
¹ Besoins totaux de la culture. Vérifier si les légumineuses et les fumiers sont déjà pris en compte dans les recommandations.			

Bibliographie

- California Plant Health Association, 2002. *Western Fertilizer Handbook*, 9th ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.
- California Fertilizer Association, 1998. *Western Fertilizer Handbook, 2nd Horticulture Edition*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.
- Follet, R. H., Murphy, L. S. et Donohue, R. L., 1981. *Fertilizers and Soil Amendments*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall.
- Follet et coll. *Farm Chemicals Handbook*. Willoughby, Ohio. Meister Publishing Company.
- Frye, W., 2005. *Nitrification Inhibition For Nitrogen Efficiency And Environment Protection*. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt, Germany, 28–30 June 2005.
- Garcia, M.C., J.A. Diez, A. Vallejo, L. Garcia, M.C. Cartagena, 1997. *Effect of applying soluble and coated phosphate fertilizers on phosphate availability in calcareous soils and on P absorption by a rye-grass crop*. J. Agric. Food Chem. 45 (5) 1931–1936.
- Grant, Cynthia, 2005. *Policy aspects related to the use of enhanced efficiency fertilizers: Viewpoint of the scientific community*. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt, Germany, 28–30 June 2005.
- Hall, William, 2005. *Benefits of enhanced-efficiency fertilizers for the environment*. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt, Germany, 28–30 June 2005.
- Havlin, J. L., J. D. Beaton, S. L. Tisdale et W. L. Nelson, 2005. *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. 7th ed. Pearson Education Inc., Upper Saddle River, New Jersey 07458.

Hoeft, Robert G., Emerson D. Nafziger, Richard R. Johnson et Samuel R. Aldrich. 2000. *Modern Corn and Soybean Production, First Edition*. MCSP Publications, P.O. Box 248, Savoy, IL 61874-0248. www.mcsp-pubs.com.

Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario.

Guide agronomique des grandes cultures, publication 811F.

Flue-Cured Tobacco Production Recommendations, publication 298 (en anglais seulement).

Recommandations pour les cultures fruitières, publication 360F.

Ginseng Production Recommendations, publication 610 (en anglais seulement).

Plantes de pépinière et d'ornement, culture et lutte intégrée, publication 383F.

Recommandations pour la gestion des gazons, publication 384F.

Recommandations pour les cultures légumières, publication 363F.

Office des normes générales du Canada. Hull, Canada K1A 1G6.
www.tpsgc.gc.ca/cgsb/home/index-f.html.

Stevenson, C.K., 1994. *Penicillium bilaii phosphorus research with corn*. Ridgetown College of Agricultural Technology report. 38 pp. Ridgetown, Ontario.

UNIDO et IFDC, 1998. *Fertilizer Manual* (3rd edition). 615 pages. ISBN 0-7923-5032-4. Kluwer Academic Publishers. www.unido.org/en/doc/3551.





ANNEXES

ANNEXE A. Feuille de calcul des mélanges d'engrais : exemple pour mélanges N-K ou P-K

1. Dresser la liste des ingrédients disponibles et des formules.

Ingrédient

Formule

2. Préciser les besoins en éléments nutritifs (ou le ratio ou la formule désirés).

3. Calculer la quantité de l'ingrédient nécessaire pour combler les besoins en chaque élément nutritif. Répéter pour chaque élément nutritif.

$\frac{\text{besoin}}{\text{proportion de l'élément}} = \text{quantité de l'ingrédient}$

$\frac{\text{besoin}}{\text{proportion de l'élément}} = \text{quantité de l'ingrédient}$

$\frac{\text{besoin}}{\text{proportion de l'élément}} = \text{quantité de l'ingrédient}$

4. Ajouter le poids des ingrédients et calculer les apports d'éléments nutritifs.

Ingrédient	Poids	N	P_2O_5	K_2O
------------	-------	---	----------	--------

Le poids total du mélange à ce point est la dose. Les unités seront les mêmes que pour les besoins initiaux en éléments nutritifs.

5. Calculer la quantité totale d'engrais nécessaire.

$\text{dose} \times \text{superficie du champ} = \text{poids total de l'engrais}$

6. Rajuster le poids des ingrédients pour obtenir la formule en kilogrammes/tonne.

Diviser le poids de chacun des ingrédients par le poids total et multiplier par 1000.

Ingrédient	Poids	N	P_2O_5	K_2O
------------	-------	---	----------	--------

Total

Formule (diviser par 10 les totaux N, P et K)

ANNEXE B. Feuille de calcul des mélanges d'engrais : exemple pour mélanges N-P-K

1. Dresser la liste des ingrédients disponibles et des formules.

Ingrédient

Formule

2. Préciser les besoins en éléments nutritifs (ou le ratio ou la formule désirés).

3. Calculer la quantité de l'ingrédient (PDA ou PMA) nécessaire pour combler le besoin en N (ratios de P élevés) ou en P (ratios de N élevés).

$$\frac{\text{besoin}}{\text{proportion de l'élément}} = \text{quantité de l'ingrédient}$$

4. Calculer l'apport de l'autre élément procuré par la quantité de l'ingrédient calculée.
 ingrédient nécessaire x proportion de l'élément = apport

5. Retrancher du besoin en l'autre élément l'apport de cet autre élément, procuré par la quantité de l'ingrédient calculée, de manière à obtenir le besoin résiduel en l'autre élément. (Nota : si l'apport est supérieur au besoin, c'est que le calcul fait en premier visait le mauvais élément nutritif. Reprendre à l'étape 3.)

$$\text{besoin} - \text{apport} = \text{besoin résiduel}$$

6. Déterminer la quantité de l'ingrédient nécessaire pour répondre au besoin résiduel (source de N ou source de P).

$$\frac{\text{besoin résiduel}}{\text{proportion de l'élément}} = \text{quantité de l'ingrédient}$$

7. Préciser la quantité de potasse nécessaire pour répondre au besoin en K.

$$\frac{\text{besoin en K}}{\text{proportion de l'élément}} = \text{quantité de l'ingrédient}$$

**ANNEXE B. Feuille de calcul des mélanges d'engrais :
exemple pour mélanges N-P-K (suite)**

8. Calculer de la même façon tous les ingrédients nécessaires pour chacun des autres oligo-éléments.

9. Ajouter le poids des ingrédients et calculer les apports d'éléments nutritifs.

Ingrédient	Poids	N	P₂O₅	K₂O
PMA				
urée				
potasse				
Total				

Le poids total du mélange à ce point est la dose. Les unités seront les mêmes que pour les besoins initiaux en éléments nutritifs.

10. Calculer la quantité totale d'engrais nécessaire.

dose × superficie du champ = poids total de l'engrais

11. Rajuster le poids des ingrédients pour obtenir la formule en kilogrammes/tonne.

Diviser le poids de chacun des ingrédients par le poids total et multiplier par 1000.

Ingrédient	Poids	N	P₂O₅	K₂O
PMA				
urée				
potasse				
Total				

Formule (diviser par 10 les totaux N, P et K)

Il est maintenant possible de calculer le prix de l'engrais.

ANNEXE C. Feuille de calcul relative aux applications d'engrais

Culture prévue

Culture précédente

Fumier épandu (type, quantité)

Autres sources organiques
d'éléments nutritifs

Engrais de démarrage (dose, formule)

Azote supplémentaire (dose, formule)

	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Besoins (lb/ac) ¹			
moins légumineuses			
moins fumier			
moins biosolides d'épuration			0
Besoins totaux en engrais minéral			
moins engrais de démarrage			
moins engrais épandu en bandes latérales			
Besoins totaux en engrais épandu en pleine surface			
¹ Besoins totaux de la culture. Vérifier si les légumineuses et les fumiers sont déjà pris en compte dans les recommandations.			

ANNEXE D. Conversions et équivalences

Du métrique à l'impérial

litres/hectare $\times 0,09$ = gallons/acre

litres/hectare $\times 0,36$ = pintes/acre

litres/hectare $\times 0,71$ = chopines/acre

millilitres/hectare $\times 0,015$ = onces liquides/acre

grammes/hectare $\times 0,015$ = onces/acre

kilogrammes/hectare $\times 0,89$ = livres/acre

tonnes/hectare $\times 0,45$ = t imp./acre

De l'impérial au métrique

gallons/acre $\times 11,23$ = litres/hectare (L/ha)

pintes/acre $\times 2,8$ = litres/hectare (L/ha)

chopines/acre $\times 1,4$ = litres/hectare (L/ha)

onces liquides/acre $\times 70$ = millilitres/hectare (mL/ha)

t imp./acre $\times 2,24$ = tonnes/hectare (t/ha)

livres/acre $\times 1,12$ = kilogrammes/hectare (kg/ha)

onces/acre $\times 70$ = grammes/hectare (g/ha)

Équivalences liquides

litres/hectare		gallons/acre
50	=	5
100	=	10
150	=	15
200	=	20
250	=	25
300	=	30

Équivalences poids sec

kilogrammes/hectare		livres/acre
1,1	=	1
1,5	=	1 $\frac{1}{4}$
2,0	=	1 $\frac{3}{4}$
2,5	=	2 $\frac{1}{4}$
3,25	=	3
4,0	=	3 $\frac{1}{2}$
5,0	=	4 $\frac{1}{2}$
6,0	=	5 $\frac{1}{4}$
7,5	=	6 $\frac{3}{4}$
9,0	=	8
11,0	=	10
13,0	=	11 $\frac{1}{2}$
15,0	=	13 $\frac{1}{2}$

Équivalences poids sec

grammes/hectare		onces/acre
100	=	1 $\frac{1}{2}$
200	=	3
300	=	4 $\frac{1}{2}$
500	=	7
700	=	10

De l'impérial au métrique (approximations)

Longueur

1 pouce = 2,54 cm
1 pied = 0,30 m
1 verge = 0,91 m
1 mille = 1,61 km

Surface

1 pied carré = 0,09 m²
1 verge carrée = 0,84 m²
1 acre = 0,40 ha

Volume (solides)

1 verge cube = 0,76 m³
1 boisseau = 36,37 L

Volume (liquides)

1 once liquide imp. = 28,41 mL
1 chopine imp. = 0,57 L
1 gallon imp. = 4,54 L
1 gallon US = 3,79 L

Pression

1 livre au pouce carré = 6,90 kPa

Poids

1 once = 28,35 g
1 livre = 453,6 g
1 t imp. = 0,91 tonne

Température

°C = (°F - 32) × 5/9
°F = (°C × 9/5) + 32

Du métrique à l'impérial (approximations)

Longueur

1 millimètre (mm) = 0,04 pouce
1 centimètre (cm) = 0,40 pouce
1 mètre (m) = 39,40 pouces
1 mètre (m) = 3,28 pieds
1 mètre (m) = 1,09 verge
1 kilomètre (km) = 0,62 mille

Surface

1 centimètre carré (cm²) = 0,61 pouce carré
1 mètre carré (m²) = 10,77 pieds carrés
1 mètre carré (m²) = 1,20 verge carrée
1 kilomètre carré (km²) = 0,39 mille carré
1 hectare (ha) = 107 636 pieds carrés
1 hectare (ha) = 2,5 acres

Volume (liquides)

1 millilitre (mL) = 0,035 once liquide
1 litre (L) = 1,76 chopine
1 litre (L) = 0,88 pinte
1 litre (L) = 0,22 gallon imp.
1 litre (L) = 0,26 gallon US

Volume (solides)

1 centimètre cube (cm³) = 0,061 pouce cube
1 mètre cube (m³) = 1,031 verge cube
1 mètre cube (m³) = 35,31 pieds cubes
1000 mètres cubes (m³) = 0,81 acre-pied
1 hectolitre (hL) = 2,8 boisseaux

Poids

1 gramme (g) = 0,035 once
1 kilogramme (kg) = 2,21 livres
1 tonne (t) = 1,10 tonne courte (t imp.)
1 tonne (t) = 2 205 livres

Vitesse

1 mètre/seconde = 3,28 pieds/seconde
1 mètre/seconde = 2,24 milles/heure
1 kilomètre/heure = 0,62 mille/heure

Pression

1 kilopascal (kPa) = 0,15 livre/pied carré

GLOSSAIRE

Acide : Solution renfermant un excès d'ions hydrogène (H^+). Cette solution aura un pH inférieur à 7.

Adsorber : Coller à la surface de quelque chose, par opposition à être absorbé dans quelque chose. Les ions des éléments nutritifs sont généralement adsorbés à la surface des particules argileuses.

Aérobie(s), conditions : Conditions caractérisées par la présence d'oxygène (air).

Agent d'extraction : Solution utilisée dans les analyses de sols pour extraire les éléments nutritifs du sol et connaître ainsi la proportion de ces éléments nutritifs qui sont assimilables par les végétaux. Aucun agent d'extraction n'est assez polyvalent pour convenir à tous les éléments nutritifs ni à tous les types de sols.

Alcalin(e) : Solution renfermant un excès d'ions hydroxydes (OH^-). Cette solution a un pH supérieur à 7.

Allélopathique : Se dit d'une culture qui, en se décomposant, dégage des composés qui nuisent à la croissance ou à la vigueur de la culture suivante.

Anaérobie(s), conditions : Conditions caractérisées par l'absence d'oxygène. On retrouve

généralement de telles conditions dans les sols gorgés d'eau.

Analyse garantie : Appelée également garantie, doit être décrite comme l'analyse minimale garantie, sauf pour le chlore (dans les engrais du tabac) où le pourcentage maximal doit être garanti. Les garanties s'expriment en termes d'éléments chimiques, sauf pour le phosphate assimilable (P_2O_5) et la potasse soluble (K_2O).

Anion : Ion à charge négative produit par la dissociation d'un acide ou d'un sel pendant la dissolution dans l'eau (p. ex. $KCl \rightarrow K^+$, un cation, + Cl^- , un anion). Parmi les anions les plus courants dans le sol et importants pour les cultures, il y a les nitrates (NO_3^-), les phosphates (PO_4^{3-}), les sulfates (SO_4^{2-}) et les chlorures (Cl^-).

Auto-analyseur : Appareil qui automatise les tâches répétitives qui font partie des analyses chimiques. Dans la plupart des analyses de sols et de tissus végétaux, la concentration des divers éléments est déterminée par l'intensité de la couleur obtenue une fois les éléments mélangés à des composés spécifiques.

Biosolides : Matières organiques de sources industrielles ou municipales incluant un vaste éventail de matières allant des

boues d'épuration aux boues de papeteries, qui se prêtent à l'épandage sur des terres agricoles.

Calcaire : Sol qui contient du carbonate de calcium sous forme minérale. Ces sols ont un pH élevé et constituent un milieu très « tamponné », c.-à-d. qui oppose une grande résistance aux changements de pH.

Cation : Ion à charge positive résultant de la dissociation d'un acide ou d'un sel dissout dans l'eau (p. ex. $\text{KCl} \rightarrow \text{K}^+$, un cation, + Cl^- , un anion). Habituellement, les cations sont retenus dans le sol étant attirés par les particules de sol et la matière organique chargées négativement sous l'effet de l'attraction électrostatique. Les cations d'importance pour les cultures qu'on trouve couramment dans le sol sont le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), le potassium (K^+), l'hydrogène (H^+), le fer (Fe^{2+} ou 3^+) et l'ammonium (NH_4^+).

Chélate : Molécule organique complexe qui peut enrober un ion métallique et le lier à plusieurs endroits, maintenant l'ion en solution et le protégeant des réactions qui pourraient le précipiter en composé insoluble. Les chélates servent de supports à certains engrais à base d'oligo-éléments et d'agents d'extraction aux fins de déterminer les concentrations d'oligo-éléments assimilables dans le sol.

Chélation : Processus de combinaison d'un ion métallique avec un chélate.

Chlorose : Altération de la couleur des tissus végétaux par suite d'une perte de chlorophylle. Habituellement, les tissus jaunissent, mais leur couleur peut aller de vert pâle à presque blanc.

Coefficient : Nombre décrivant la relation entre deux autres nombres ou objets.

Colloïdes : Particules fines (moins de 0,002 mm de diamètre) d'argile ou de matière organique. Les colloïdes portent une charge négative et sont responsables de la plus grande partie de la capacité du sol à retenir les éléments nutritifs.

Complexe : Qualifie ce qui se combine avec un seul ion métallique à plusieurs endroits différents, comme dans le cas des chélates.

Corrélés : Liés l'un à l'autre. Ainsi une augmentation du rendement d'une culture pourrait être corrélée à la quantité d'engrais ajoutée.

Dénitrification : Conversion des nitrates (NO_3^-) en azote gazeux (N_2) ou oxydes d'azote (NO_x) par des bactéries. Ce phénomène se produit dans des conditions pauvres en oxygène et peut entraîner une perte considérable d'azote assimilable vers l'atmosphère.

Densité apparente : Voir Masse volumique apparente.

Désorber : Enlever un ion de la surface sur laquelle il était adsorbé. Cela se fait habituellement par l'ajout d'un excé-

dent d'ions, qui désorbent les autres des surfaces argileuses.

DTPA : Chélate utilisé comme agent d'extraction dans le dosage du zinc et d'autres oligo-éléments pendant une analyse de sol, et comme support dans les engrais à base d'oligo-éléments (acide diéthylènetriaminepentacétique).

Échange cationique : Mouvement continu des ions positifs (cations) entre la solution du sol et la surface des minéraux argileux et de la matière organique. Ce mouvement procure un équilibre entre les ions en solution et les ions adsorbés. L'ajout ou le prélèvement d'ions dans la solution perturbe cet équilibre, entraînant un échange d'ions jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit atteint.

EDTA : Chélate utilisé comme agent d'extraction dans le dosage du zinc et d'autres oligo-éléments pendant une analyse de sol, et comme support dans les engrais à base d'oligo-éléments (acide éthylènediaminetétracétique).

Équation de Mitscherlich : Équation servant à décrire le gain de rendement procuré par un apport d'engrais ou un niveau donné de fertilité du sol. La courbe correspondant à cette équation n'atteint jamais un rendement maximal.

Équation quadratique : Équation servant à décrire le gain de rendement procuré par un apport d'engrais. La courbe représentant cette équation

atteint une valeur maximale, puis commence à descendre à mesure que la dose augmente.

Équilibre : Du fait du grand nombre de réactions chimiques qui peuvent se produire dans les deux sens, présence ultime dans un mélange des réactifs initiaux et des produits des réactions en équilibre. L'exemple le plus courant de ce type de réaction dans les sols est l'adsorption de cations sur des particules de sol à charge négative. Certains cations demeurent toujours en solution et sont en équilibre avec les cations retenus sur les particules du sol. Il y a mouvement constant des cations entre la solution et les particules du sol, mais les concentrations moyennes restent les mêmes.

État d'ameublissement : Structure et friabilité du sol propice à l'obtention d'un bon lit de semences dans un sol.

Fixation : 1. Réduction de l'azote atmosphérique, qui n'est pas assimilable par les plantes, en ammonium, sous l'effet de l'action microbienne. 2. Fixation du potassium entre les couches de certains minéraux argileux (vermiculite et smectite) le rendant non assimilable ou lentement assimilable par les plantes.

Formule : Concentrations d'azote total (N), de phosphate assimilable (P_2O_5) et de potasse soluble (K_2O) exprimée en pourcentage et dans cet ordre par des nombres unis par des traits d'union et disposés horizontalement,

avec des zéros s'il y a lieu. La formule de l'urée dosant 46 % d'azote est 46-0-0. Les nombres entiers compris dans la formule représentent les pourcentages minimaux garantis dans les matières et mélanges. La formule d'un mélange personnalisé (engrais de formule client) peut être exprimée en pourcentage précis à deux décimales près, p. ex. : 19,25-19,21-19,27.

Garantie : Voir Analyse garantie.

Hygroscopique : Attraction et absorption d'eau de l'atmosphère. Nombre d'ingrédients d'engrais sont hygroscopiques et s'agglutinent en raison de l'humidité qu'ils absorbent s'ils sont exposés à l'air ambiant.

ICP : Spectromètre d'émission au plasma inductif.

Immobilisation : Incorporation d'éléments nutritifs dans les tissus microbiens et la matière organique, ce qui les rend non assimilables temporairement ou de façon permanente par les plantes. L'immobilisation temporaire de l'azote peut se produire si l'on ajoute au sol des matières organiques à forte teneur en carbone.

Indice de salinité : Indice de solubilité relative des divers ingrédients des engrais, selon la masse totale. Il n'existe pas de niveau critique, mais plus l'indice de salinité est élevé, plus il y a risque de dommages aux semences ou aux racines lorsque l'engrais entre en contact avec elles. L'indice s'ex-

prime par rapport au nitrate de sodium, qui a une valeur de 100.

Indice-phosphore : Indicateur du risque de contamination des eaux de surface par le P contenu dans les eaux de ruissellement des terres agricoles. Pour évaluer ce risque, l'indice tient compte de la proximité des plans d'eau, de la gestion des terres, de la vulnérabilité à l'érosion et des concentrations de P dans le sol et dans les matières épandues.

Ion : Atome ou molécule portant une charge électrique soit positive (cation) ou négative (anion). La plupart des ions sont formés par dissociation des acides ou sels pendant la dissolution dans l'eau (p. ex. $\text{KCl} \rightarrow \text{K}^+$, un cation, + Cl^- , un anion).

Lessivage : Déplacement dans le sol des ions emportés par l'eau jusque dans les eaux souterraines. Le lessivage ne se produit que s'il y a un mouvement de descente net de l'eau (habituellement de la fin de l'automne au printemps) et des ions présents dans la solution de sol. Les nitrates, les sulfates et les chlorures sont les ions les plus vulnérables au lessivage.

M : Symbole de mole. La mole est le nombre de molécules d'un élément donné ayant une masse en grammes qui équivaut à la masse atomique de l'élément. En d'autres termes, une mole d'hydrogène (masse atomique = 1) pèse un gramme. Une solution d'une mole (1 M) contient une mole de composé dissous dans un litre d'eau.

Masse volumique apparente (ou densité apparente) : Quotient de la masse d'un matériau par le volume que celui-ci occupe. Dans le sol, la masse volumique apparente est un indice du degré de compactage du sol. Au moment de l'épandage d'engrais, la masse volumique apparente est importante dans le réglage des taux d'application, puisque les épandeurs mesurent les engrais en volume plutôt qu'en masse.

Minéralisation : Libération des éléments nutritifs par la matière organique au fur et à mesure de sa dégradation par l'action microbienne.

Mycorhizes : Champignons symbiotiques colonisant les racines de nombreuses cultures, contribuant ainsi à l'expansion du système racinaire et au prélèvement des éléments nutritifs, particulièrement du phosphore. Le terme vient du grec *myco*, qui signifie champignon, et de *rhiza*, qui signifie racine.

N-P-K : Représente la formule garantie. Dans le calcul des formules, il est courant d'utiliser le symbole du phosphore (P) pour désigner le phosphate assimilable (P_2O_5) et le symbole du potassium (K) pour la potasse soluble (K_2O).

pH : Mesure de l'alcalinité ou de l'acidité d'une solution. L'échelle du pH va de 0 à 14. Un pH de 7 est dit neutre. Un pH inférieur à 7 est acide et un pH supérieur à 7, alcalin. Le pH de la plupart des sols se situe entre 5 et 8.

pH tampon : Mesure de la quantité de chaux nécessaire à la neutralisation de l'acidité dans un sol donné. On utilise parfois le terme « pouvoir tampon » pour référer à cette caractéristique du sol.

Phloème : Cellules creuses interreliées (tissu vasculaire) s'étendant des feuilles jusqu'aux racines et aux fruits à travers les tiges. La circulation de l'eau et des éléments nutritifs dessous est bidirectionnelle dans le phloème, qui constitue la voie de redistribution des glucides, des protéines et des éléments nutritifs mobiles dans la plante.

Phosphate assimilable : Dans un engrais, la somme des phosphates solubles dans l'eau et dans les citrates, exprimée sous forme d'anhydride phosphorique (P_2O_5).

Pondération : Correction apportée à une dose en fonction de la fertilité du sol et en fonction de l'agent d'extraction utilisé dans l'analyse de sol.

Potasse : Dans l'industrie des engrais, ce terme désigne à la fois le K_2O (oxyde de potassium) pour mesurer la teneur en potassium, et le KCl (chlorure de potassium) pour identifier le matériau de l'engrais.

Potasse soluble : Partie de la potasse, exprimée sous forme d'oxyde de potassium (K_2O), qui est soluble dans l'oxalate d'ammonium liquide, le citrate d'ammonium liquide ou l'eau pendant l'application d'une méthode internationale de l'AOAC.

Sodique : Se dit d'un sol dans lequel la plus grande partie du complexe d'échange cationique est occupée par le sodium. Ces sols sont caractérisés par une rétraction et un gonflement importants et une très faible stabilité structurelle lorsqu'ils sont mouillés.

Spectrométrie d'absorption

atomique : Technique d'analyse permettant de décomposer un extrait en ses différents éléments dans une flamme, puis de déterminer la concentration de chacun de ces éléments en faisant traverser la flamme par un faisceau et en mesurant l'absorption par ces éléments de longueurs d'ondes spécifiques.

Sphérule : Petit granule d'urée ou de nitrate d'ammonium.

Suspension : Mélange de matières solides finement moulues et d'eau, ou solution, que l'on agite pour maintenir les matières solides en suspension dans le liquide. On peut transporter de plus fortes concentrations d'engrais dans une suspension que dans une véritable solution.

Verse : État des cultures inclinées ou versées sur le sol en raison d'un enracinement inadéquat ou d'une rupture des tiges. Les céréales peuvent verser s'il y a excès d'azote.

Volatilisation : Perte de vapeur, habituellement d'ammoniac, dans l'air, par une matière solide épandue sur la surface du sol.

Volume de sol par acre : Volume de terre végétale jusqu'à une profondeur de 6 pouces sur une superficie de un acre. Le poids de ce volume de sol est d'environ 2 000 000 livres. L'équivalent métrique — volume de sol par hectare (sur une épaisseur de 15 cm) — pèserait environ 2 300 tonnes (métriques).

Xylème : Tubes creux s'étendant des racines jusqu'aux feuilles et aux organes de fructification d'une plante. L'eau et les éléments nutritifs dissous ne peuvent que remonter le xylème. La plupart des éléments nutritifs qui pénètrent dans les plantes se déplacent dans le xylème.

INDEX

- Absorption atomique, 43-44
- Accroissement et maintien, 157-162
- Acidification, 98-99, 112-113
- Acidité de réserve, 26-27, 102
- Agents d'extraction. *Voir* extraction, agents.
- Agriculture biologique, 115, 193
- Aluminium, 98
- Ammoniac. *Voir* ammonium.
- Ammoniac anhydre, 181
- Ammonium, 61-64, 116
perte dans le fumier, 124, 129
- Analyse de tissus végétaux, 44, 173
échantillons, 9-12
manutention des échantillons, 44
- Analyses de sols
agents d'extraction, 20-23
analyses reconnues, 23-25
dosage d'éléments nutritifs, 17
manutention d'échantillons, 17
pondération, 151-152
résultats, 18-20
unités du rapport, 17
- Anthocyanine, 71
- Application d'engrais,
méthodes, 204
- Auto-analyseur, 43-44
- Azote, 61-66
carence, 65-66
fumier, 124
immobilisation, 63, 146
légumineuses, 142
lessivage, 63
minéralisation, 62, 143
organique, 124-125
rôle chez les végétaux, 64
- Besoins en chaux ou de
chaulage, 27, 104
- Biosolides, 141
contaminants, 127
teneur en éléments nutritifs, 123
- Biosolides d'épuration, 118, 126,
212-213, 221
- Biosolides de pâtes et
papiers, 116, 123
- Bore, 87-88
analyses, 36
carence, 88
toxicité, 87
- Brûlure par engrais, 202-207
- Cadmium, 94
- Calcium, 76-78
agents d'extraction, 32-33
carence, 77-78
rapport avec les autres éléments
nutritifs, 76
rôle chez les plantes, 76
- Calcul des formules, 196-197
- Capacité d'échange cationique,
41-43, 49-53, 167
estimation, 41
mesure, 42
- Cation, 32, 51
- CEC. *Voir* capacité d'échange
cationique.
- Chaulage
besoins, 27, 104
délai d'efficacité, 111
semis direct, 110
- Chaux,
besoins, 27, 104
épandage, 110
granulométrie, 106-107
incorporation, 110
qualité, 105
- Chaux agricole. *Voir* chaux.

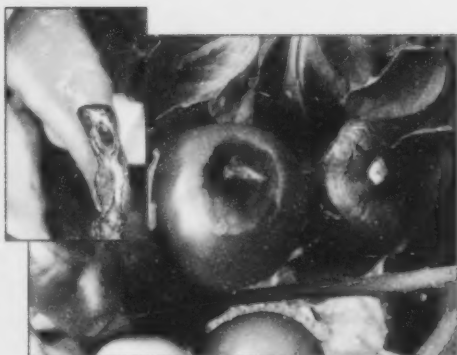
- Chaux calcitique, 107-108, 188
- Chaux dolomitique, 107-108, 188
- Chaux granulaire, 108
- Chaux liquide, 108
- Chélateurs, 34, 191
- Chlore, 89-90
- Chlorure, 89-90
- Chlorure de potassium, 185-186
- Cobalt, 92
- Compatibilité des matériaux d'engrais, 194-195
- Compost, 115-116, 123, 125, 130
- Concentrations critiques, 171
- Concentrations insuffisantes, 171
- Concentrations suffisantes, 171
- Conductivité du sol, 30
- Contrôle de la qualité des laboratoires, 24-25
- Couvre-sol. *Voir* cultures de couverture.
- Cuivre, 88-89
 - analyse, 36
 - carence, 89
 - toxicité pour le mouton, 89
- Cultivar, 151
- Cultures de couverture, 146
 - immobilisation de l'azote, 146
- Cycle de l'azote, 64
- Dénitrification, 63
- Densité de peuplement et espacement des plantes, 151
- Diagnostic des problèmes,
 - échantillons de sol, 15
 - échantillons de tissus végétaux, 15
- Diagnostic des problèmes culturaux, 14
- Diffusion, 57
- Dosage des éléments nutritifs,
 - azote des nitrates, 28-29
 - magnésium, 32-33
 - oligo-éléments, 33-34
 - phosphore, 30-32
 - potassium, 32-33
- Doses maximales sécuritaires d'éléments nutritifs, 205
- DRIS, 174
- DTPA, 34-35, 191
- Eau, effet sur la réaction aux fertilisants, 149
- Échange cationique, 50-51
- Échantillonnage du sol, 1
 - composite, 6
 - géoréférence, 7
 - grille, 7-8
 - profondeur, 1
 - semis direct, 9
 - labour en bandes, travail sur billon, 8-9
- Échantillonnage des tissus végétaux,
 - analyses, 44-46
 - arbres fruitiers, 9
 - moment, 11
 - parties de plantes, 11
 - vignes, 9
- Échantillonnage en vue du dosage des nitrates (sols), 3-4
 - analyses, 28-29
 - manipulation des échantillons, 3-4
- Écoulement de masse, 59-60
- EDTA, 34-35, 191
- Éléments nutritifs,
 - enlèvement, 170, 175-176
 - planification de la gestion, 135
 - prélèvement, 170, 175-176
- Engrais acides, 187
- Engrais au potassium, 185-186
- Engrais azotés, 179-185
 - efficacité accrue, 191-192
- Engrais d'entretien, 159-164

- Engrais de démarrage et de transplantation, 210
- Engrais foliaires, 210-211
- Engrais granulaires, 179-186
- Engrais liquides, 179, 187, 190, 206-210
- Engrais phosphorés, 183-185
 - efficacité accrue, 192-193
- Engrais sulfatés, 186, 188
- Enlèvement d'éléments nutritifs.
 - Voir* éléments nutritifs.
- Épandage d'engrais, 202-212
 - de pleine surface, 204
 - en bandes, 207
 - en bandes latérales, 209
 - feuille de calcul, 212-213
 - méthodes, 204
 - placé en contact avec la semence (de type « pop-up »), 208
- Épandage en bandes en profondeur, 209-210
- Épandeurs d'engrais, 204-210
 - à taux variable, 207
 - de pleine surface, 204
 - en bandes latérales, 209
 - pneumatiques, 206
 - rotatifs, 206
- Équation de Mitscherlich, 154-155
- Équation quadratique, 154-155
- Équations de gains de rendement, 154-155
- Extraction, agents,
 - à l'acétate d'ammonium, 33
 - à l'acide phosphorique, 35-36
 - au bicarbonate de sodium, 30-31
 - Bray, 31-32
 - Olsen, 30-31
- Facteurs de conversion,
 - de phosphore à phosphate, 128
 - de potassium à potasse, 128
 - de pourcentage à unités de poids, 128
- Fer, 36, 91
 - carence, 91
 - dosage, 31
- Fertirrigation, 211
- Fixation,
 - azote, 61
 - potassium, 53
- Formule, 196
- Four à combustion, 39
- Fumier, 115-141
 - analyse, 45
 - densité, 134
 - échantillonnage, 12-14
 - éléments nutritifs du, 116-123
 - moment des épandages, 129
 - préoccupations
 - environnementales, 138
 - réglage de l'épandeur, 134
 - semis direct, 138
 - traitement, 116-119, 130
 - transformations, 117
 - variabilité, 13
- Gain de rendement. *Voir* rendement, gains de.
- Granulométrie, 106-107
- Gypse, 111, 188
- Humus, 52-53
- ICP, 44
- Immobilisation de l'azote, 63
- Indice agricole, 109
- Indice de salinité, 182
- Inhibiteurs de la nitrification, 192
- Inhibiteurs d'urée, 191-192
- Interception racinaire, 78
- Législation applicable aux engrais, 197-198
- Légumineuses, 61-62, 92
 - azote assimilable, 144
 - systèmes culturels, 142
- Localisation des engrais, 202, 207-210

- Magnésium, 78-80, 107-108, 188-189
 - agents d'extraction, 32
 - carence, 79
 - rapport avec les autres éléments nutritifs, 73, 78
 - rôle chez les plantes, 78
- Maladies, 150
- Manganèse, 85-87, 97
 - carence, 85
 - indice de biodisponibilité, 36
 - toxicité, 87
- Matière organique, 52
 - analyses, 37
- Mauvaises herbes, 150
- Mehlich III, 23, 30-33, 35, 37
- Mélange d'engrais, 193-201
 - feuille de calcul, 199-201
 - ségrégation, 195-196
 - uniformité des granulés, 195
- Mélanges personnalisés, 193-194
- Mercure, 94
- Méthode Walkley Black, 38
- Minéralisation, 62
- Minéraux argileux, 50-51, 53
- Mobilité des éléments nutritifs, 60
- Molybdène, 91-92
 - carence, 92
- MVA. *Voir* mycorhizes vésiculaires-arbusculaires.
- Mycorhizes, 56
- Mycorhizes vésiculaires-arbusculaires, 56
- NAU. *Voir* nitrate d'ammonium et d'urée.
- Nickel, 92
- Nitrate d'ammonium, 180
- Nitrate d'ammonium et de calcium, 180
- Nitrate d'ammonium et d'urée, 180
- Nitrate de calcium, 183
- Nitrate de potassium, 183
- Nitrification, 63
 - effet sur le pH, 187-188
- Objectif de rendement, 162
- Oligo-éléments, 83-94
 - agents d'extraction, 33-37
 - fertilisants, 190-193
- Phosphate diammonique, 184
- Perte par calcination, 37-38
- pH du sol, 97
 - échantillonnage, semis direct, 8
 - mesure, 26
 - pH élevé, 97, 101
 - symptômes, 101-102
- pH tampon, 102-104
- pH. *Voir* pH du sol ou pH tampon.
- Phloème, 59
- Phosphate, 183-185
 - diammonique, 184
 - monoammonique, 184
 - naturel, 185
- Phosphore, 66-71
 - analyses, 30-33
 - assimilabilité, 67-69
 - carence, 71
 - effet du pH du sol, 68
 - fumier, 126
 - localisation, 69
 - rapport avec les autres éléments nutritifs, 70
 - rôle chez les plantes, 70
- Phytase, 117-118
- Planification de la gestion des éléments nutritifs. *Voir* éléments nutritifs.
- Plomb, 94
- Pluie acide, 81, 83, 99
- Poils absorbants, 54-55
- Polyphosphate d'ammonium, 185
- Pondération des résultats d'analyses de sols,
 - en fonction de l'accroissement et du maintien, 159-161, 164
 - en fonction d'une fertilisation suffisante, 159-163

- Potassium, 72-75
 - analyses, 32
 - assimilabilité, 72
 - carence, 75
 - fourrages, 73-75
 - fumier, 126
 - rapport avec les autres éléments nutritifs, 73
 - rôle chez les plantes, 74
- Pourriture apicale, 77
- Prélèvement d'éléments nutritifs.
 - Voir* éléments nutritifs.
- Raisins, 9
 - arbres fruitiers, 9
 - calendrier, 11
 - parties de la plante, 10
- Ratio azote:soufre, 82
- Ratio carbone:azote, 65, 125
- Ratio carbone:soufre, 82
- Ration C:N. *Voir* ratio carbone:azote.
- Ratios de saturation en bases, 165-166
- Réduction du pH du sol, 112-113
- Rendement, gains de
 - attribuables à l'apport d'engrais, 152
 - attribuables à la fertilité du sol, 153
- Rotation des cultures, 144, 150-151
- Saturation en bases, 41-43
 - pourcentage, 165
 - ratios, 165
- Sélénium, 93
- Sels d'Epsom, 188-189
- Sels solubles, 28
- Semis direct, 8, 138
- Sensibilité aux oligo-éléments, 86
- SGN, 195
- Silicium, 93
- Sodium, 92-93
- Solution tampon SMP, 26-27
- Soufre, 80-83
 - analyses, 36-37
 - carence, 82
 - dépôt, 81
 - rôle chez les plantes, 82
- Spectrométrie d'émission atomique, 44
- Sulfate d'ammonium, 183
- Sulfate de magnésium et de potassium, 186
- Sulfate de potasse, 186
- Sulfate de potassium, 186
- Superphosphate, 183-184
- Superphosphate simple, 183
- Superphosphate triple, 184
- Suspensions d'engrais, 187
- Symptômes de carence. *Voir chaque élément nutritif.*
- Système Tru-Spread, 206
- Tétanie d'herbage, 79, 167
- Texture du sol, 39-40
- Urée, 179
- Valeur neutralisante, 105
- Vanadium, 93
- Variabilité des résultats des analyses de sols, 168
- Variabilité du sol, 5
- Volatilisation, 64, 124, 130
- Xylème, 55, 59
- Zinc, 83-85
 - carence, 84
 - indice de biodisponibilité, 84





Carence en calcium (Pourriture apicale)

Poivron et tomate, comté de Kent

- Faible mobilité du Ca dans les tissus végétaux.
- Carence habituellement causée, non pas par un sol ou des racines pauvres en Ca, mais par un manque d'eau ou une forte transpiration durant la nouaison.

Voir p. 77

Carence en manganèse



Pois de transformation, comté de Kent



Soya, comté de Middlesex
Source : Dale Cowan, CCA-ON

- Faible mobilité du Mn tant dans le sol que dans les tissus végétaux.
- Symptômes pouvant inclure rabougrissement et chlorose internervaire.
- Carence surtout observée dans les sols à pH élevé, les terres noires et les sols érodés.

Voir p. 85

Carence en bore

Luzerne, comté de Kent

- Symptômes incluant raccourcissement des entre-nœuds, altération de la couleur des feuilles, problèmes de floraison et de grenaison.
- Carence fréquente dans les sols à texture légère en périodes de sécheresse.

Voir p. 87





www.ontario.ca/omafra

